EL AISLAMIENTO ACÚSTICO (IV)

por

César Díaz Sanchidrián



CUADERNOS DEL INSTITUTO JUAN DE HERRERA DE LA *ESCUELA DE* ARQUITECTURA *DE MADRID*

3-51-13

EL AISLAMIENTO ACÚSTICO (IV)

por

CÉSAR DÍAZ SANCHIDRIÁN

CUADERNOS
DEL INSTITUTO
JUAN DE HERRERA
DE LA *ESCUELA DE*
ARQUITECTURA
DE MADRID

3-51-13

CUADERNOS
DEL INSTITUTO
JUAN DE HERRERA

NUMERACIÓN

2 Área
51 Autor
09 Ordinal de cuaderno (del autor)

0 VARIOS
1 ESTRUCTURAS
2 CONSTRUCCIÓN
3 FÍSICA Y MATEMÁTICAS
4 TEORÍA
5 GEOMETRÍA Y DIBUJO
6 PROYECTOS
7 URBANISMO
8 RESTAURACIÓN

I ***El aislamiento acústico (IV)***

Instituto Juan de Herrera.
Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid.
Gestiòn y portada : Nadia Soddu.
CUADERNO 298.01 / 3-51-13
ISBN: 978-84-9728-320-5 (obra completa)
ISBN-13: 978-84-9728-324-3
Depósito Legal: M- 5050-2010

ÍNDICE

L 8 EL AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO ENTRE RECINTOS

8.1 INTRODUCCIÓN

En la lecciones anteriores se ha estudiado el índice de reducción acústica de diferentes sistemas constructivos de una o varias hojas aisladas en laboratorio. En un recinto una pared o un forjado no funcionan de forma independiente, todos los sistemas constructivos del recinto son potenciales transmisores de la energía acústica. El estudio del comportamiento del estado de vibración de un edificio, por pequeño que este sea, es un problema matemático de gran complejidad.

Entre dos recintos adyacentes, todos los paramentos que limitan el recinto emisor se ponen en vibración cuando emite una fuente sonora en su interior y consecuentemente los paramentos que limitan el recinto receptor se ponen a vibrar como consecuencia de las uniones que tienen entre si los paramentos de los dos recintos. El aislamiento acústico a ruido aéreo entre dos recintos contiguos es menor que el aislamiento acústico a ruido aéreo de la pared separadora. ¿Como se puede predecir el aislamiento acústico a ruido aéreo entre recintos?

La transmisión acústica entre dos recintos se produce por diferentes caminos, los directos y los indirectos. *Las transmisiones directas* se realizan únicamente a través del elemento separador. Incluyen las transmisiones del sonido que incidiendo sobre el elemento separador es radiado por este al recinto receptor, y el ruido aéreo transmitido a través de huecos y rendijas en el mismo. Las transmisiones directas dependen básicamente del aislamiento acústico del elemento separador y de su superficie. *Las transmisiones indirectas*, se subdividen en *indirectas por vía sólida o transmisiones por flancos*, (paredes, techos, suelos) e *indirectas por vía aérea* (corredores, techos suspendidos, sistemas de ventilación, etc.). Las transmisiones indirectas dependen de la constitución de las paredes laterales, forjados, etc. y del tipo de ligazón con el elemento separador.

El sonido entre recintos contiguos se transmite de manera directa través de la pared separadora, camino Dd y por los caminos de flanco: Ff, Df, Fd. El aislamiento acústico a ruido aéreo entre los dos recintos dependerá de la cantidad de energía acústica transmitida por cada uno de los caminos (1 Dd; 4Fd; 4Df; 4Ff).

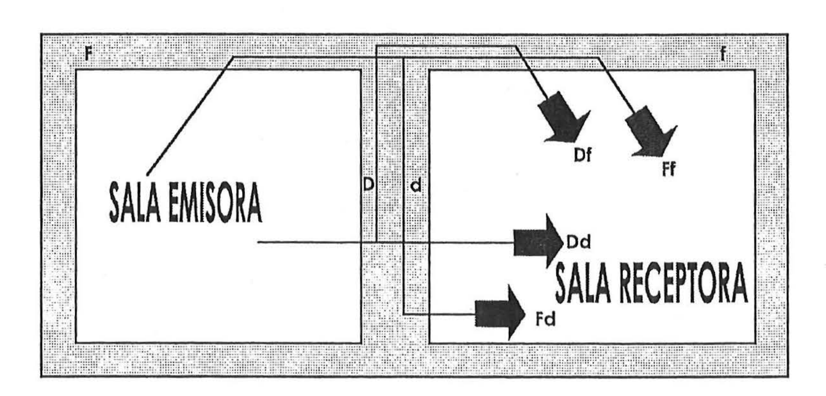


Figura 8.1: Caminos de transmisión acústica entre dos recintos.

En los edificios las transmisiones indirectas son importantes, y en algunos casos pueden ser predominantes. El aislamiento acústico entre dos recintos depende de las transmisiones del sonido por cada uno de los caminos de transmisión, su valor estará muy condicionado por el sistema constructivo de menor aislamiento acústico. Las transmisiones indirectas son tanto mayores cuanto más ligeros son los elementos constructivos adyacentes. Únicamente cuando la masa por unidad de superficie de los elementos constructivos adyacentes es ≥ 400 kg/m² puede no tenerse en cuenta la transmisión indirecta del sonido.

En cada unión del recinto hay una cierta cantidad de atenuación acústica que depende del tipo de unión, relación entre masas y amortiguamiento acústico de los componentes. En la figura 8.2 se muestra el porcentaje de la energía transmitida por vías indirectas entre dos recintos contiguos en función del índice de reducción acústica de la pared de separación. Si se desea obtener un elevado aislamiento a ruido aéreo entre recintos adyacentes se debe dedicar una atención especial a la disminución de las transmisiones indirectas.

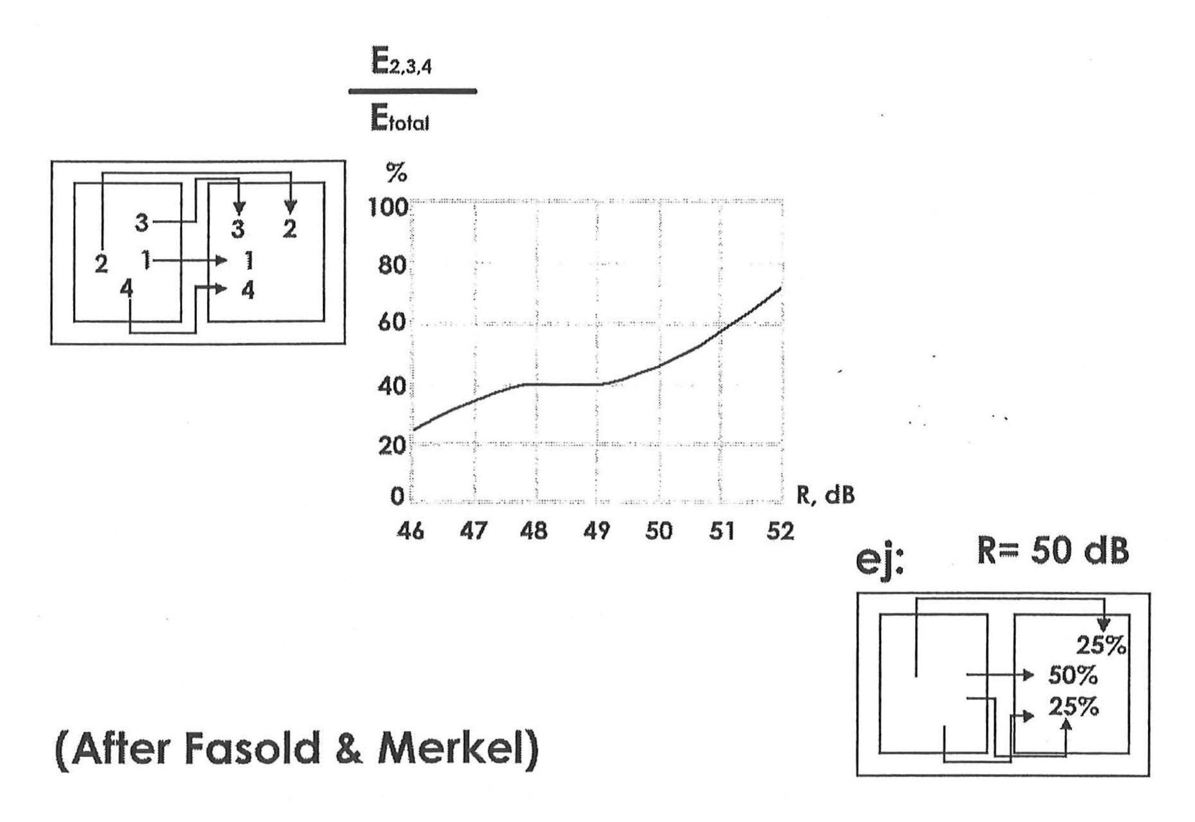


Figura 8.2: Energía transmitida por vías indirectas entre dos recintos contiguos en función del índice de reducción acústica de la pared de separación. (Fasold, Merkel, Berlín, 1969).

En la figura 8.3 se muestra el efecto de las transmisiones por flancos en el aislamiento a ruido aéreo entre recintos. La pared de separación entre los recintos es de citara de ladrillo cerámico perforado enlucido por las dos caras. Este elemento constructivo en laboratorio tiene un índice global de aislamiento acústico R_A = 47 dBA. En las mediciones realizadas in situ entre recintos (dormitorios, salones) los resultados promedios de varios centenares de ensayos son R'_A = 41 dBA.

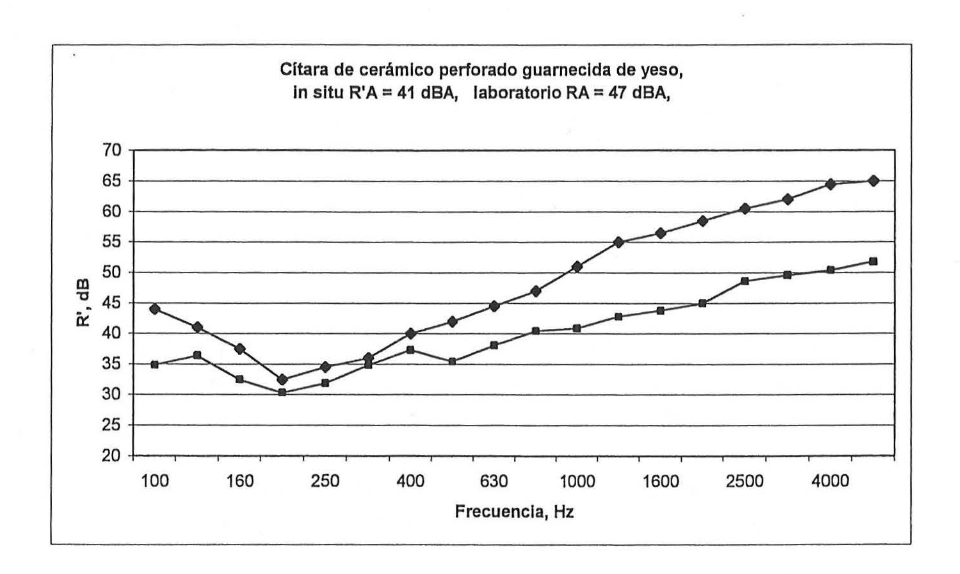


Figura 8.3: Comparación entre el índice de reducción acústica acústico de una pared de citara de ladrillo cerámico perforado en laboratorio y el índice de reducción acústica aparente medido in situ entre recintos. El área de la superficie de separación en ambos casos es del mismo orden de magnitud.

8.2 LOS MODELOS PREDICTIVOS EN ACÚSTICA DE LA EDIFICACIÓN

Es de gran interés el poder predecir el aislamiento acústico entre recintos en la fase de proyecto del edificio. Existen diferentes métodos, uno de ellos es el SEA, (Statistical Energy Analysis), sin embargo este método es muy complejo y el Comité Europeo de Normalización (CEN) ha elaborado diferentes modelos para la predicción del índice aparente de reducción acústica y del aislamiento a ruidos de impactos aparente, a partir de los valores obtenidos en laboratorio del aislamiento a ruidos aéreos y de impactos de diferentes productos y sistemas constructivos obtenidos aplicando las Normas ISO 140 correspondientes.

Estos modelos de predicción estiman las características acústicas de las edificaciones a partir de las características de sus elementos. Se recogen en las Normas EN 12354 en sus diferentes partes 1, 2, 3, 4, 5, 6,... La precisión de la predicción de estos modelos de cálculo depende del tipo de sistemas constructivos que intervienen y de la complejidad de las uniones entre ellos. El comportamiento acústico de los sistemas constructivos pesados de una hoja es más fácil de predecir que el de sistemas ligeros multihojas.

MÉTODO DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO ENERGÉTICO

El método del análisis estadístico de energía, SEA, es una aproximación para resolver problemas complejos relacionados con la acústica y las vibraciones. Es una parte de la Dinámica estructural y sus orígenes se remontan a principios de los años 1960: (Smith; Lyon, Maidanik,..) y fue desarrollado para el diseño de naves espaciales, posteriormente se aplicó a problemas de transmisión del sonido en barcos, aviones, trenes, coches y edificios (Craik, 1996).

El método SEA se utiliza para modelar sistemas complejos resonantes. El término estadístico supone que el análisis, contrario a los métodos de los elementos finitos (FEM, BEM), no proporciona una información exacta sobre el comportamiento del sistema, por ejemplo como responde el sistema a una excitación de una determinada frecuencia. Los datos calculados representarán valores promedios. Estos procedimientos estadísticos ajustan bien en la acústica de los edificios, pues los detalles de los sistemas constructivos, uniones, etc. no son conocidos con gran precisión y se tienen que realizar aproximaciones.

Si en un sistema complejo podemos definir el acoplamiento acústico entre sus partes mediante sencillos factores de proporcionalidad de la energía acústica almacenada o transmitida por cada subsistema, podremos definir su configuración de estado de equilibrio, y definir su respuesta ante una excitación acústica.

El método es viable si existe un factor de proporcionalidad, este existe si se analiza la energía acústica contenida en una banda de frecuencia suficientemente ancha. Una banda de frecuencia es suficientemente ancha cuando contiene un número elevado de modos propios del subsistema.

El método SEA parte de las siguientes hipótesis:
1- La pérdida de energía dentro de un subsistema es proporcional a la energía total del subsistema.
2- La energía transmitida de un subsistema a otro es proporcional a la diferencia de la energía modal.
3. Estadísticamente, las fuerzas que gobiernan los diferentes subsistemas son independientes. Es decir, para calcular la energía modal total de cada subsistema se pueden sumar las respuestas resultantes de cada fuerza de entrada

La energía modal se define como:

$$E_m = \frac{E(\Delta\omega)}{n(\omega)\Delta\omega} \qquad \frac{W.s}{Hz} \tag{8.1}$$

Donde:
- $E(\Delta\omega)$ es la energía total del sistema en una banda de frecuencia angular $\Delta\omega$
- $n(\omega)$ es la densidad modal, la densidad de frecuencias naturales en una estructura, es el número de frecuencias naturales en una banda de ancho unidad, de frecuencia angular central ω, (Δω = 1).
- Δω, es el ancho de banda, rad/s

El método SEA puede ser utilizado mediante diferentes procedimientos. Uno de los más comunes es predecir el factor de pérdidas y después, a partir de las ecuaciones de balance del flujo de potencia se predice el comportamiento acústico de los sistemas.

El flujo de potencia entre dos subsistemas puede definirse en función de la energía y de los factores de acoplamiento

$$W_{ij} = E_i \omega \eta_{ij} \qquad W \tag{8.2}$$

El factor de pérdidas de acoplamiento η_{ij} del subsistema i al subsistema j depende de la conexión entre los subsistemas.

El factor de pérdidas total es la suma de los factores de pérdidas de acoplamiento y el factor de pérdidas interno.

Para un subsistema i, la potencia disipada en forma de calor es el producto de la energía del subsistema E_i, de la frecuencia angular ω y del factor de pérdidas interno η_{id}.

El método SEA considera que se cumple el principio de reciprocidad entre dos susbsistemas con la misma energía modal, esto implica que se cumple

$$n_i(\omega)\eta_{ij} = n_j(\omega)\eta_{ji} \qquad (8.3)$$

Dados dos subsistemas con igual energía total, el subsistema de menor densidad de energía modal transmite más energía al de mayor densidad de energía modal, que al contrario.

El flujo neto de energía entre dos sistemas acoplados en una banda de frecuencia estrecha, $\Delta\omega$, es proporcional a la diferencia de las energías modales de los dos sistemas a la misma frecuencia. El modelo vibroacustico SEA formalmente es análogo a la transmisión de energía térmica entre los sistemas.

8.3.- LA NORMA UNE EN 12354.1: ACÚSTICA EN LA EDIFICACIÓN. ESTIMACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS ACÚSTICAS DE LAS EDIFICACIONES A PARTIR DE LAS CARACTERÍSTICAS DE SUS ELEMENTOS. PARTE 1: AISLAMIENTO ACÚSTICO ENTRE RECINTOS.

Esta norma describe modelos de cálculo para estimar el aislamiento acústico a ruido aéreo entre recintos de edificios, utilizando en primer lugar los resultados de las medidas de las transmisiones directas e indirectas a través de los elementos constructivos del edificio y posteriormente métodos teóricos obtenidos a partir de la propagación de las ondas acústicas en los elementos estructurales.

También describe un método detallado para el cálculo en bandas de frecuencia, que permite calcular el índice global a partir de los resultados. A partir de este modelo se deduce un modelo simplificado con un campo de aplicación más restringido, que calcula directamente el índice global del aislamiento acústico a ruido aéreo entre recintos de edificios, utilizando el índice global de los elementos, es el que aplicaremos en esta lección.

Describe los principios del modelo de cálculo, enumera las magnitudes relevantes y define sus aplicaciones y restricciones. Este documento está orientado a expertos en acústica y establece la estructura para el desarrollo de documentos de aplicación y herramientas para otros usuarios en el campo de la construcción de edificios, teniendo en cuenta situaciones locales.

Los modelos de cálculo descritos utilizan la aproximación más general para propósitos de ingeniería, en clara relación con magnitudes medibles que especifican las características de los elementos constructivos. Las limitaciones conocidas de estos modelos de cálculo están descritas en estos documentos. Los usuarios deben saber que existen otros modelos de cálculo con su propio campo de aplicación y restricciones.

Los modelos están basados en la experiencia de la predicción para viviendas; también podrían aplicarse a otros tipos de edificios siempre que los sistemas de construcción y

las dimensiones de los elementos de construcción no sean muy diferentes a los que se encuentran en los edificios de viviendas.

MAGNITUDES RELEVANTES

Define las magnitudes relevantes que expresan las características del edificio y de los elementos. Algunas de las magnitudes no definidas en lecciones anteriores y necesarias para la aplicación de esta norma son las siguientes:

Diferencia de nivel normalizada para la transmisión aérea indirecta $D_{n,s}$
Es la diferencia de nivel de presión acústica, promediada espacial y temporalmente, producida entre dos recintos, con una fuente activa en uno de ellos. Se considera que la transmisión se produce sólo a través de un camino específico entre los recintos, (por ejemplo sistemas de ventilación, pasillos). $D_{n,s}$ se normaliza a un área de absorción acústica equivalente de referencia, $A_0 = 10\ m^2$ en el recinto receptor.

$$D_{n,s} = L_1 - L_2 - 10\lg\frac{A}{A_0} \quad dB \tag{8.4}$$

A es el área de absorción acústica equivalente en el recinto receptor, en m^2.
Esta magnitud debe determinarse según un método comparable al de la Norma EN 20140-10.

Diferencia de nivel normalizada de flancos $D_{n,f}$
Es la diferencia de nivel de presión acústica, promediada espacial y temporalmente, producida entre dos recintos, con una fuente activa en uno de ellos. Se considera que la transmisión se produce sólo a través de un único elemento de flanco entre los dos recintos, (por ejemplo techos suspendidos, suelos continuos, fachadas). $D_{n,f}$ se normaliza a un área de absorción acústica equivalente de referencia, $A_0 = 10\ m^2$ en el recinto receptor.

$$D_{n,f} = L_1 - L_2 - 10\lg\frac{A}{A_0} \quad dB \tag{8.5}$$

A es el área de absorción acústica equivalente en el recinto receptor, en m^2.
Esta magnitud debe determinarse según el método de la Norma EN ISO 10848-1.

Índice de reducción de vibraciones K_{ij}. Esta magnitud está relacionada con la transmisión de potencia vibratoria a través de una unión entre elementos estructurales, normalizada con objeto de hacerla una magnitud invariante. Se determina normalizando la diferencia de niveles de velocidad promediados en todas las direcciones sobre la unión, con la longitud de la unión y la longitud de absorción equivalente, si fuera relevante, de ambos elementos según la siguiente ecuación:

$$K_{ij} = \frac{D_{v,ij} + D_{v,ji}}{2} + 10\lg\frac{l_{ij}}{\sqrt{a_i a_j}} \quad dB \tag{8.6}$$

donde
$D_{v,ij}$ es la diferencia del nivel de velocidad entre los elementos i y j, cuando el elemento i es excitado, en dB;

$D_{v,ji}$ es la diferencia del nivel de velocidad entre los elementos j e i, cuando el elemento j es excitado, en dB;
l_{ij} es la longitud común de la unión entre los elementos i y j, en metros;
a_i es la longitud de absorción equivalente del elemento i, en metros;
a_j es la longitud de absorción equivalente del elemento j, en metros;

La longitud de absorción equivalente viene dada por

$$a = \frac{2{,}2\pi^2 S}{c_0 T_s}\sqrt{\frac{f_{ref}}{f}} \qquad (8.7)$$

T_s es el tiempo de reverberación estructural del elemento i o j, en segundos;
S es el área del elemento i o j, en m^2;
f es la frecuencia central de la banda en Hz;
f_{ref} es la frecuencia de referencia; f_{ref} = 1000 Hz;
c_0 es la velocidad del sonido en el aire, en m/s.

Nota1- La longitud de absorción equivalente es la longitud de una arista imaginaria totalmente absorbente de un elemento al que se le supone una frecuencia crítica de 1000 Hz, y que da las mismas pérdidas que las pérdidas totales del elemento en una situación dada.

La magnitud K_{ij} debe ser determinada según la norma EN ISO 10848-1

Nota 2- Para el tiempo de reverberación se pueden tomar los valores del anexo E o pueden deducirse de los datos disponibles sobre la diferencia del nivel de velocidad en la unión según este mismo anexo.

Datos sobre otros elementos.
Para el cálculo puede ser necesario información adicional, por ejemplo: densidad superficial m′ en kg/m^2; tipo de elementos; material; tipo de unión.

Otros términos y magnitudes

Transmisión directa. Transmisión debida sólo al sonido incidente sobre un elemento separador y radiado directamente por él (procedencia estructural) o transmitido a través de sus partes (procedencia aérea) tales como rendijas, dispositivos que mueven aire o colisas.

Transmisión indirecta. Transmisión del sonido desde un recinto emisor al recinto receptor, a través de caminos de transmisión distintos del directo. Se pueden dividir en transmisión aérea y estructural. Esta última se llama transmisión por flancos.

Transmisión aérea indirecta. Transmisión indirecta de energía acústica por vía aérea principalmente; p.e. sistemas de ventilación, techos suspendidos y pasillos.

Transmisión indirecta estructural (transmisión por flancos). Transmisión de energía acústica desde el recinto emisor hasta el recinto receptor principalmente por vía estructural (vibraciones) de la construcción, por ejemplo paredes, suelos, techos.

Diferencia de nivel de velocidad en la unión promediada en dirección $\overline{D}_{v,ij}$. Promedio de la diferencia del nivel de velocidad en la unión desde el elemento i al j, y desde el elemento j al i.

$$\overline{D}_{v,ij} = \frac{D_{v,ij} + D_{v,ji}}{2} \qquad (8.8)$$

Índice de reducción acústica por flancos R_{ij}. Es menos diez veces el logaritmo decimal del factor de transmisión por flancos ζ_{ij}, que es cociente entre la potencia acústica W_{ij} radiada desde la construcción de flanco j al recinto receptor debida al sonido incidente sobre la construcción i del recinto emisor, y la potencia acústica W_1 que incide sobre un área de referencia en el recinto emisor. El área del elemento separador se elige como área de referencia.

$$R_{ij} = -10 \lg \tau_{ij} \quad dB \qquad (8.9)$$

donde

$$\tau_{ij} = \frac{W_{ij}}{W_1}$$

NOTA- El área del elemento separador se elige como referencia ya que así la contribución de cada camino de transmisión a la transmisión total está directamente indicado, lo que no ocurre en otros casos.

MODELOS DE CÁLCULO

Principios generales

Entre dos recintos adyacentes, la potencia acústica en la sala receptora es debido al sonido radiado por los elementos estructurales de separación y los elementos estructurales de flancos en ese recinto y por la transmisión acústica aérea directa o indirecta pertinente.

El factor total de transmisión total es la suma de los diferentes factores de transmisión relacionados con cada elemento del recinto receptor y con los elementos y sistemas implicados en la transmisión aérea directa o indirecta:

$$R' = -10 \lg \tau' \qquad (8.10)$$

$$\tau' = \frac{W_{total}}{W_1} \qquad (8.11)$$

W_{total} es la potencia sonora transmitida a la sala receptora, W_1 es la potencia sonora total incidente sobre el elemento común de separación.

El índice de reducción sonora aparente se compone de las siguientes contribuciones:

$$R' = -10 \lg(\tau_d + \sum_{f=1}^{m} \tau_f + \sum_{e=1}^{n} \tau_e + \sum_{s=1}^{k} \tau_s) \qquad (8.12)$$

donde

τ_d, es la relación entre la potencia sonora radiada por la parte común del elemento separador y la potencia sonora incidente sobre el mismo. Incluye los caminos Dd y Fd.

τ_f, es la relación entre la potencia sonora radiada por un elemento de flanco f en el recinto receptor y la potencia sonora incidente sobre la parte común del elemento separador. Incluye los caminos Ff y Df.

τ_e, es la relación entre la potencia sonora radiada al recinto receptor por un elemento situado en la parte común del elemento separador, debido a la transmisión directa del ruido aéreo del sonido incidente sobre este elemento y la potencia sonora incidente sobre la parte común del elemento separador.

τ_s, es la relación entre la potencia sonora radiada a la sala receptora por un sistema s, debida a la transmisión indirecta del ruido aéreo sobre dicho sistema, y la potencia sonora incidente sobre la parte común del elemento separador.

n, es el número de elementos de flanco, generalmente son cuatro, pero puede ser mayor o menor.
m, es el número de elementos con transmisión directa del ruido aéreo.
k es el número de sistemas con transmisión aérea indirecta.

El sonido radiado por un elemento estructural se puede considerar como la suma de la transmisión del sonido estructural a través de varios caminos. Cada camino puede identificarse por un elemento i sobre el cual el sonido incide en el recinto emisor y un elemento radiante j en el recinto receptor. Los caminos para un elemento de flanco y el elemento separador se muestran en la figura 8.1, donde en el recinto emisor los elementos i se designan por F para elementos de flanco y D para el elemento separador, y en el recinto receptor los elementos j se designan por f para los elementos de flanco y d para los elementos separadores.

Las hipótesis principales de la aproximación son que los caminos de transmisión descritos se pueden considerar independientes y que los campos acústico y vibratorio se comportan estadísticamente. Ésta aproximación es bastante general, permitiendo elementos estructurales tales como: elementos monolíticos, paredes con cavidades, paredes ligeras de doble hoja y diferentes posiciones en el recinto. El modelo se restringe a recintos adyacentes y a elementos constructivos de los que se conoce el índice de reducción vibracional K_{ij}.

El factor de transmisión para el elemento separador está constituido por las contribuciones de la transmisión directa y n transmisiones de flanco.

$$\tau_d = \tau_{Dd} + \sum_{F=1}^{n} \tau_{Fd} \tag{8.13}$$

El factor de transmisión para cada elemento de flanco f en el recinto receptor está constituido por las contribuciones de dos transmisiones por flancos

$$\tau_f = \tau_{Df} + \tau_{Ff} \tag{8.14}$$

Los factores de transmisión de estos caminos de transmisión estructural están relacionados con el índice de reducción acústica para la transmisión directa (R_{Dd}) y con el índice de reducción acústica por flancos (R_{ij}) mediante las ecuaciones:

$$\tau_{Dd} = 10^{-0,1R_{Dd}} \; ; \qquad \tau_{ij} = 10^{-0,1R_{ij}} \tag{8.15}$$

Los factores de transmisión para la transmisión aérea directa o indirecta están relacionados con la diferencia de nivel normalizada del elemento, $D_{n,e}$ y con la diferencia de nivel normalizada para la transmisión indirecta $D_{n,s}$ mediante las ecuaciones:

$$\tau_e = \frac{A_0}{S_s} 10^{-0,1D_{n,e}} \; ; \qquad \tau_e = \frac{A_0}{S_s} 10^{-0,1D_{n,s}} \tag{8.16}$$

Donde S_s es el área del elemento separador en m^2; A_0 es el área de absorción acústica equivalente de referencia, en m^2

El modelo detallado calcula las características de la edificación en bandas de frecuencia, basándose en los datos acústicos de los elementos constructivos por bandas de

frecuencia. En bandas de octava al menos de 125 Hz a 2000 Hz y en tercios de octava de 100 Hz a 3150 Hz. A partir de estos datos se puede calcular el índice global según la Norma EN ISO 717-1.

El modelo detallado tiene en cuenta las transmisiones estructurales y las transmisiones aéreas directa e indirecta.

El modelo simplificado calcula las características del edificio como un índice global basado en los índices globales de los elementos involucrados. El modelo simplificado considera únicamente la transmisión estructural.

Modelo simplificado para la transmisión estructural

Procedimiento de cálculo. La versión simplificada del modelo de cálculo predice el índice ponderado de reducción acústica aparente global a partir de los índices de reducción acústica ponderado de los elementos involucrados. Ello se refiere a la ponderación según la Norma EN ISO 717-1. El modelo es apto para el índice ponderado de reducción acústica R_w pero puede aplicarse a éste índice global con el término de adaptación espectral, es decir $R_w + C$. La estimación resultante de las características acústicas del edificio se da en el mismo tipo de índice global paro adaptado a elementos de construcción, es decir R'_w o (R'_w+C).

Nota 1- Por conveniencia las sumas con el índice de adaptación espectral se pueden denotar por un símbolo, por ejemplo $R'_w + C = R'_A$; $D_{nT,w} + C = D_{nT,A}$

Nota 2- La suma energética que se realiza en el modelo es exacta para R'_A y una razonable aproximación para R'_w

La aplicación del modelo simplificado se restringe a transmisiones directas y por flancos para elementos fundamentalmente homogéneos. La influencia del amortiguamiento estructural de los elementos se tiene en cuenta en promedio, despreciando las particularidades de cada situación. Cada elemento de flanco debería ser esencialmente el mismo por los lados de emisión y recepción. Si los valores del índice de reducción de vibraciones dependen de la frecuencia, puede que sea como una buena aproximación el valor a 500 Hz, aunque el resultado puede que sea menos preciso.

Para el modelo simplificado el índice ponderado de reducción acústica aparente entre dos recintos viene determinado por:

$$R'_w = -10.\lg\left[10^{-0,1R_{Dd,w}} + \sum_{F=f=1}^{n} 10^{-0,1R_{Ff,w}} + \sum_{f=1}^{n} 10^{-0,1R_{DF,w}} + \sum_{F=1}^{n} 10^{-0,1R_{Fd,w}}\right] \quad dB \qquad (8.17)$$

donde

$R_{Dd,w}$ es el índice ponderado de reducción acústica para la transmisión directa, en dB;
$R_{Ff,w}$ es el índice ponderado de reducción acústica por flancos para el camino de transmisión Ff, en dB;
$R_{Df,w}$ es el índice ponderado de reducción acústica por flancos para el camino de transmisión Df, en dB;
$R_{Fd,w}$ es el índice ponderado de reducción acústica por flancos para el camino de transmisión Fd, en dB;

n es el número de elementos de flanco en un recinto; normalmente n = 4, pero puede ser mayor o menor dependiendo del diseño y de la construcción de la situación considerada

Nota 3.- Para ciertas situaciones en la edificación (combinaciones de elementos ligeros o combinaciones de elementos ligeros y elementos macizos, por ejemplo con techos suspendidos o fachadas ligeras), la transmisión indirecta está dominada por el camino Ff y los dos últimos términos de la ecuación (8.17) pueden despreciarse para este elemento de flanco.

Nota 4- La contribución de un elemento de flanco a la transmisión por flancos total se puede evaluar añadiendo la transmisión correspondiente a través de los caminos Ff y Df; la contribución de la transmisión por flancos a la radiación por el elemento separador puede evaluarse mediante la transmisión por los caminos Fd para todos los elementos de flanco.

Para cada camino de transmisión el índice ponderado de reducción acústica aparente se predice de los datos de entrada sobre los elementos y uniones.

El índice ponderado de reducción acústica para la transmisión directa se determina a partir del valor de entrada del elemento separador según lo siguiente:

$$R_{Dd,w} = R_{s,w} + \Delta R_{Dd,w} \quad dB \qquad (8.18)$$

donde

$R_{s,w}$ es el índice ponderado de reducción acústica del elemento separador, en dB;
$\Delta R_{Dd,w}$ es la mejora del índice ponderado de reducción acústica del elemento separador por recubrimiento adicional del recinto emisor y/o receptor, en dB.

Los índices ponderados de reducción acústica por flancos se determinan a partir de los datos de entrada según las expresiones siguientes:

$$R_{Ff,w} = \frac{R_{F,w} + R_{f,w}}{2} + \Delta R_{Ff,w} + K_{Ff} + 10.\lg\frac{S_s}{l_0 l_f} \quad dB$$

$$R_{Fd,w} = \frac{R_{F,w} + R_{s,w}}{2} + \Delta R_{Fd,w} + K_{Fd} + 10.\lg\frac{S_s}{l_0 l_f} \quad dB \qquad (8.19a)$$

$$R_{Df,w} = \frac{R_{s,w} + R_{f,w}}{2} + \Delta R_{Df,w} + K_{Df} + 10.\lg\frac{S_s}{l_0 l_f} \quad dB$$

donde

$R_{F,w}$ es el índice ponderado de reducción acústica del elemento de flanco F en el recinto emisor, en dB;

$R_{f,w}$ es el índice ponderado de reducción acústica del elemento de flanco f en el recinto receptor, en dB;

$\Delta R_{Ff,w}$ es la mejora total del índice ponderado de reducción acústica por el recubrimiento del elemento de flanco en el lado de emisión y/o del lado de recepción, en dB.

$\Delta R_{Fd,w}$ es la mejora total del índice ponderado de reducción acústica por el recubrimiento del elemento de flanco en el lado de emisión y/o del elemento separador en el lado de recepción, en dB.

$\Delta R_{Df,w}$ es la mejora total del índice ponderado de reducción acústica por el recubrimiento del elemento separador en el lado de emisión y/o del elemento de flanco en el lado de recepción, en dB.

K_{Ff} es el índice de reducción de vibraciones para el camino de transmisión Ff, en dB;

K_{Fd} es el índice de reducción de vibraciones para el camino de transmisión Fd, en dB;

K_{Df} es el índice de reducción de vibraciones para el camino de transmisión Df, en dB;

S_s es el área del elemento separador, en m^2.

l_f es la longitud común de acoplo de la unión entre el elemento separador y los elementos de flanco F y f, en metros.

l_0 es la longitud de acoplo de referencia; $l_0 = 1$ m.

Nota 5 – Se tiene para elementos constructivos homogéneos con un factor de radiación igual a 1 el índice ponderado de reducción acústica por flancos se puede expresar como (ij = Ff, Fd o Df):

$$R_{ij,w} = R_{i,w} + \Delta R_{ij,w} + D_{v,ij,situ} + 10.\lg\frac{S_s}{S_j} \quad dB \tag{8.19b}$$

Sin embargo como la diferencia de nivel de velocidad en la unión no es una magnitud invariante esta relación es menos apropiada para realizar predicciones. Se podría utilizar en alguna situación de campo para estimar la transmisión por flancos, siempre que se dispongan de los datos apropiados para esta situación de campo, datos medidos o estimados sobre la diferencia de nivel de velocidad en la unión $D_{v,ij}$.

Nota 6 – Para ciertas construcciones de flanco, como techos suspendidos, fachadas ligeras o paredes, la transmisión está dominada por el camino Ff, de forma que las contribuciones de llos caminos Df y Fd pueden despreciarse. Si dicha transmisión se caracteriza por la diferencia ponderada de nivel por flancos $D_{n,f,w}$ se tiene que

$$R_{Ff,w} = D_{n,f,w} + 10.\lg\frac{l_{lab}}{l_f} + 10.\lg\frac{S_s}{A_0} \quad dB \tag{8.19c}$$

Para techos suspendidos esta magnitud se denota por $D_{n,c,w}$ y $l_{lab} = 4{,}5$ m.
Esto es únicamente aplicable si las dimensiones consideradas son similares a las utilizadas en laboratorio.

Datos de entrada.

Los datos acústicos de los elementos involucrados deberían obtenerse fundamentalmente mediante medidas normalizadas en laboratorio. Sin embargo, también podrían deducirse de otras formas, utilizando cálculos teóricos, estimaciones empíricas o resultados de mediciones in situ. En algunos anexos se da información sobre esto. Las fuentes de datos utilizados, deben estar claramente especificadas.
Los datos de entrada son los siguientes:

- El índice ponderado de reducción acústica de los elementos: $R_{s,w}$, $R_{F,w}$, $R_{f,w}$.
- En el anexo B se da información sobre esto para elementos homogéneos;
- el índice de reducción de vibraciones para cada unión y camino: K_{Ff}, K_{Fd}, K_{Df};
- En el anexo E se da información sobre esto para las uniones más comunes. Si los valores dependen de la frecuencia, en este modelo simplificado se usa el valor a

500 Hz. Si el valor es menor que un valor mínimo $K_{ij,min}$ se tomará este valor mínimo. El valor mínimo está dado por(ij=Ff; Fd o Df):

$$K_{ij,\min} = 10.\lg\left[l_f l_0 \left(\frac{1}{S_i} + \frac{1}{S_j} \right) \right] \quad dB \qquad (8.20)$$

Si un elemento de flanco no tiene contacto estructural con el elemento separador o éste es insignificante, K_{Ff} se ha de tomar igual a este valor mínimo, mientras que los caminos Fd y Df se desprecian (es decir, los valores de K_{ij} serán muy altos);

- La mejora total del índice ponderado de reducción acústica para el elemento separador $\Delta R_{Dd,w}$;

Este valor se obtiene directamente de resultados disponibles para la combinación adecuada o se deduce de los resultados de cada una de las capas por separada:

Una capa: $\Delta R_{Dd,w} = \Delta R_{D,w}$ o $\Delta R_{d,w}$ dB

Dos capas: $$\Delta R_{Dd,w} = \Delta R_{D,w} + \frac{\Delta R_{d,w}}{2} \quad 0 \quad \Delta R_{d,w} + \frac{\Delta R_{D,w}}{2} \quad dB \qquad (8.21)$$

- La mejora total del índice ponderado de reducción acústica para cada camino de flanco: $\Delta R_{Ff,w}$; $\Delta R_{Fd,w}$; $\Delta R_{Df,w}$

Estos valores se obtienen directamente de resultados disponibles para la combinación adecuada o se deducen de los resultados para cada una de las capas implicadas independientemente (ij=Ff; Fd o Df):

Una capa: $\Delta R_{ij,w} = \Delta R_{i,w}$ o $\Delta R_{j,w}$ dB

Dos capas: $$\Delta R_{ij,w} = \Delta R_{i,w} + \frac{\Delta R_{j,w}}{2} \quad 0 \quad = \Delta R_{j,w} + \frac{\Delta R_{i,w}}{2} \quad dB \qquad (8.22)$$

En el caso de dos recubrimientos el valor mitad se toma de aquel con un valor menor. En el anexo D se da información sobre la mejora del índice ponderado de reducción acústica.

Limitaciones

- Todas las limitaciones del modelo detallado también se aplican al modelo simplificado.
- El modelo simplificado es aplicable especialmente a viviendas en las que las dimensiones de los elementos constructivos sean similares a las empleadas en las instalaciones de ensayo. Desviaciones de este supuesto pueden dar lugar a resultados menos precisos.
- El modelo simplificado supone elementos en los que la dependencia del índice de reducción acústica con la frecuencia es similar. Con elementos que tengan un comportamiento con la frecuencia muy desviado, como por ejemplo elementos dobles, elementos ligeros, la precisión puede ser menor.

PRECISIÓN

Los modelos de cálculo predicen las características medidas de las edificaciones, suponiendo una buena ejecución de la obra y una alta precisión de la medición. La precisión de la predicción de los modelos presentados depende de muchos factores: la precisión de los datos de entrada, la adecuación de la situación concreta al modelo, el tipo de elementos y uniones involucrados, la geometría de la situación, y la ejecución de la obra. Por tanto no es posible especificar la precisión de las predicciones para todos los tipos de situaciones y aplicaciones en general. En el futuro se tendrá que recoger datos sobre la precisión mediante la comparación de los resultados del modelo con un conjunto de resultados obtenidos en situaciones reales. Sin embargo se pueden dar algunas indicaciones.

La experiencia principal en la aplicación de modelos similares, hasta donde llegue el modelo detallado, se basa hasta ahora en edificaciones donde los elementos básicos estructurales son homogéneos, por ejemplo paredes de ladrillo, hormigón, bloques de yeso, etc. En estas situaciones la predicción del índice global del modelo es, en promedio, correcto, (no hay error sistemático) con una desviación estandar entre 1,5 dB y 2,5 dB (será el valor inferior si se tienen en cuenta todos los aspectos y el superior en situaciones complejas y cuando se desprecie el tiempo de reverberación estructural).

Las predicciones del modelo simplificado muestran una desviación estandar de alrededor de 2 dB; con tendencia a sobrestimar ligeramente el aislamiento.

A la hora de aplicar las predicciones es aconsejable variar los datos de entrada, especialmente en situaciones complicadas y con elementos atípicos cuyos datos de entrada sean poco fiables. La variación resultante en los resultados da una idea de la precisión que se puede esperar para estas situaciones, súponiendo un trabajo de ejecución similar.

ANEXO E: CÁLCULO DEL ÍNDICE DE REDUCCIÓN VIBRACIONAL PARA UNIONES

Pueden obtenerse los índices de reducción de vibraciones, K_{ij}, en uniones de elementos constructivos para los distintos tipos de uniones a partir de las expresiones que se indican a continuación. Los datos empíricos disponibles dependen de las densidades superficiales de masa de los elementos conectados a la unión. Los datos disponibles son para uniones en que los elementos a ambos lados de la unión en el mismo plano tienen la misma masa. Estas expresiones están dadas en función de la magnitud M, definida como

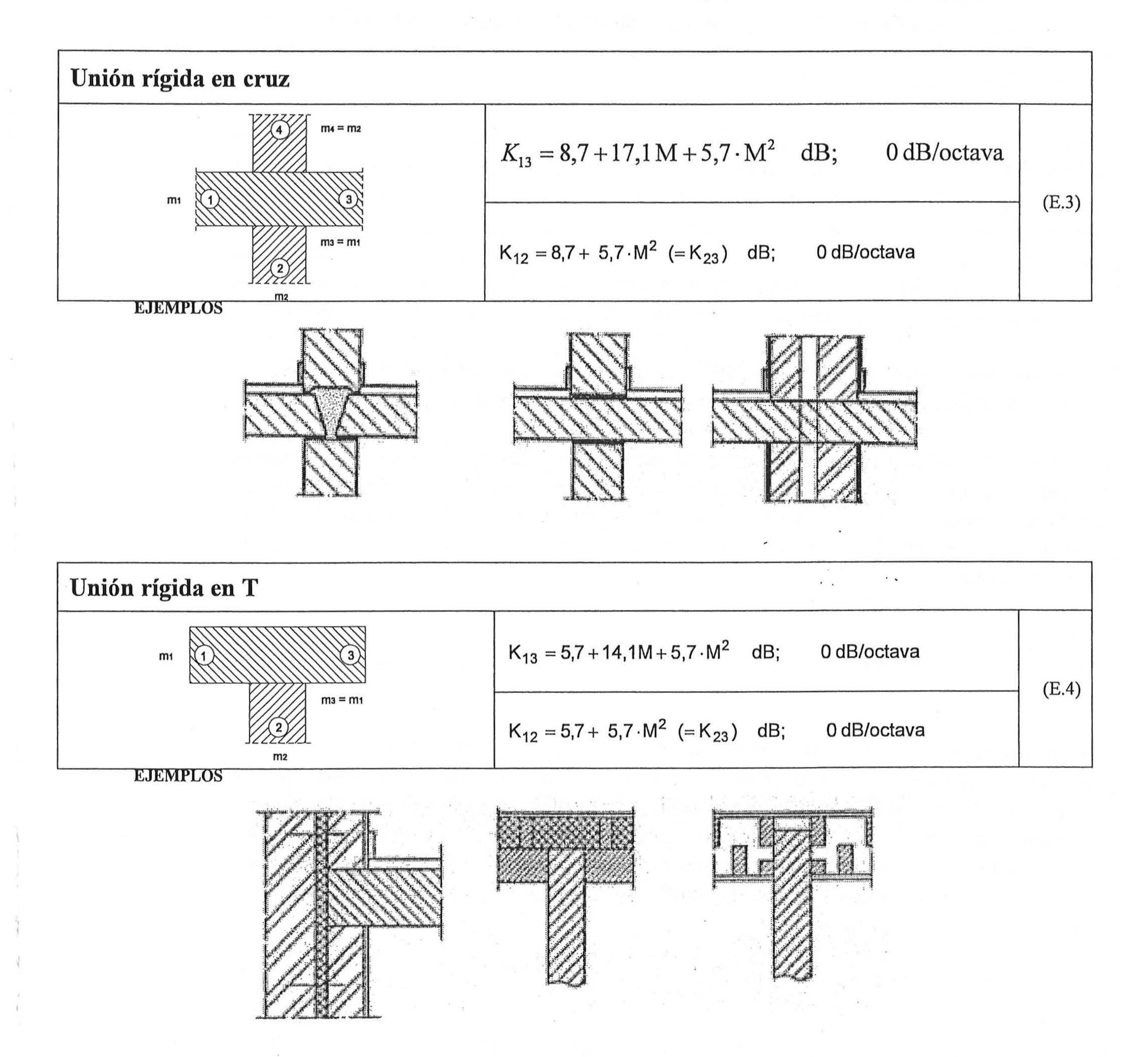
$$M = \lg \frac{m'_{j,(\perp i)}}{m'_i} \qquad \text{(E.2)}$$

Donde: m'_i es la masa por unidad de superficie del elemento i en el camino ij de transmisión, en kg/m^2

$m'_j(\perp i)$ es la masa por unidad de superficie del elemento j, perpendicular al i, que forma la unión, en kg/m^2

Para el cálculo de M, debe tomarse únicamente la masa correspondiente al elemento base o forjado conectado a los elementos constructivos colindantes y deben excluirse las masas de las capas de *revestimiento*, tales como *suelos flotantes*, *trasdosados* y techos suspendidos.

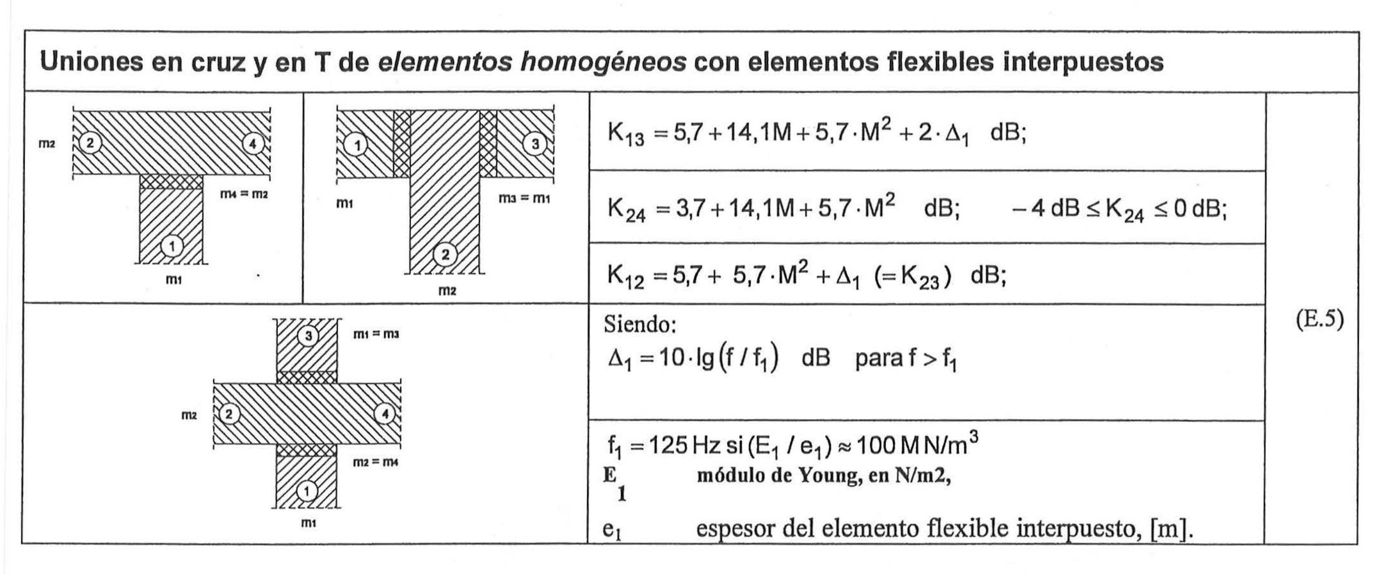
En general, la transmisión es poco dependiente de la frecuencia en el intervalo de frecuencias comprendido entre 125 Hz y 2000 Hz. En los casos en los que se indica la calificación 0 dB/*octava* a continuación de la fórmula, puede considerarse que la transmisión es independiente de la frecuencia.



Unión rígida en cruz		
	$K_{13} = 8{,}7 + 17{,}1\,\text{M} + 5{,}7 \cdot \text{M}^2$ dB; 0 dB/octava	(E.3)
	$K_{12} = 8{,}7 + 5{,}7 \cdot \text{M}^2$ $(= K_{23})$ dB; 0 dB/octava	

Unión rígida en T		
	$K_{13} = 5{,}7 + 14{,}1\,\text{M} + 5{,}7 \cdot \text{M}^2$ dB; 0 dB/octava	(E.4)
	$K_{12} = 5{,}7 + 5{,}7 \cdot \text{M}^2$ $(= K_{23})$ dB; 0 dB/octava	

Uniones en cruz y en T de *elementos homogéneos* con elementos flexibles interpuestos



$$K_{13} = 5{,}7 + 14{,}1M + 5{,}7 \cdot M^2 + 2 \cdot \Delta_1 \quad dB;$$

$$K_{24} = 3{,}7 + 14{,}1M + 5{,}7 \cdot M^2 \quad dB; \qquad -4\,dB \le K_{24} \le 0\,dB;$$

$$K_{12} = 5{,}7 + 5{,}7 \cdot M^2 + \Delta_1 \; (= K_{23}) \quad dB; \qquad (E.5)$$

Siendo:

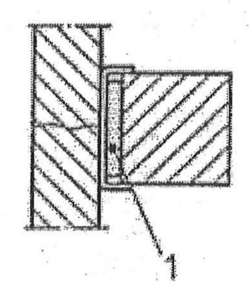
$\Delta_1 = 10 \cdot \lg(f / f_1)$ dB para $f > f_1$

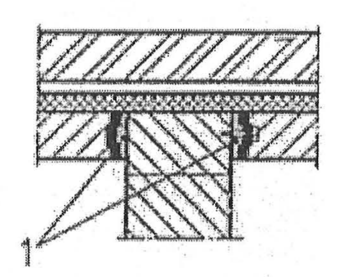
$f_1 = 125$ Hz si $(E_1 / e_1) \approx 100$ M N/m^3

E_1 módulo de Young, en N/m2,

e_1 espesor del elemento flexible interpuesto, [m].

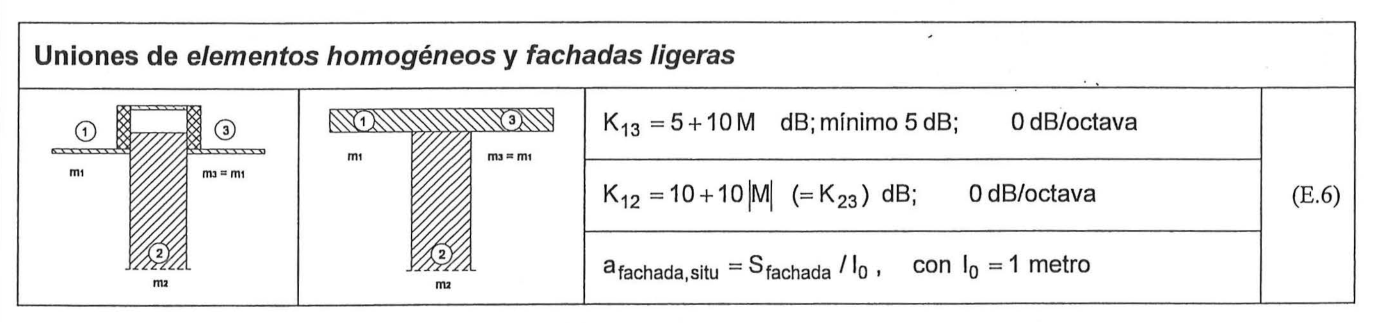
EJEMPLOS





1 Elástico

Uniones de *elementos homogéneos* y *fachadas ligeras*

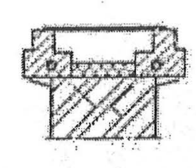


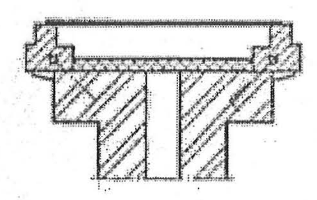
$$K_{13} = 5 + 10\,M \quad dB; \text{mínimo } 5\,dB; \qquad 0\,dB/octava$$

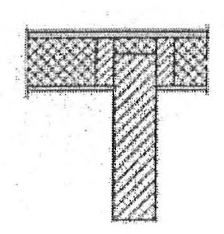
$$K_{12} = 10 + 10\,|M| \; (= K_{23}) \quad dB; \qquad 0\,dB/octava \qquad (E.6)$$

$$a_{fachada,situ} = S_{fachada} / l_0, \quad \text{con } l_0 = 1 \text{ metro}$$

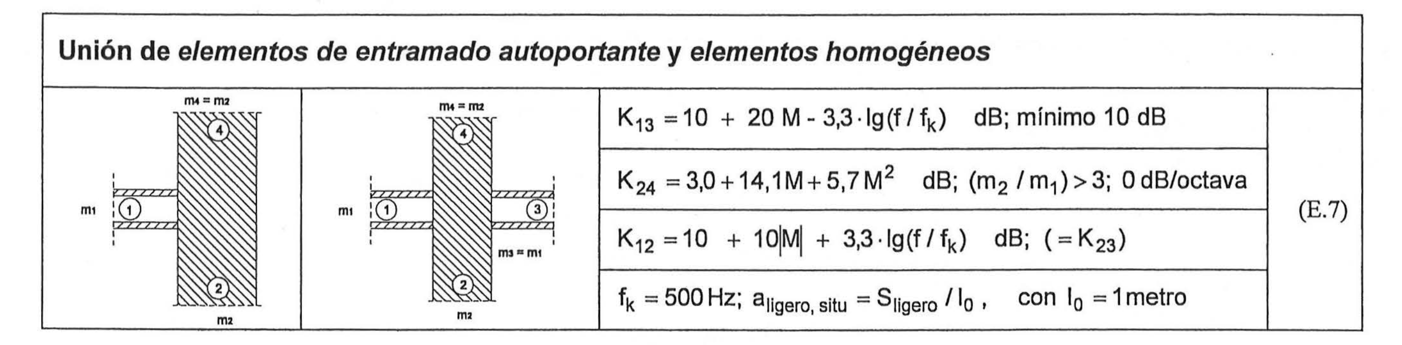
EJEMPLOS





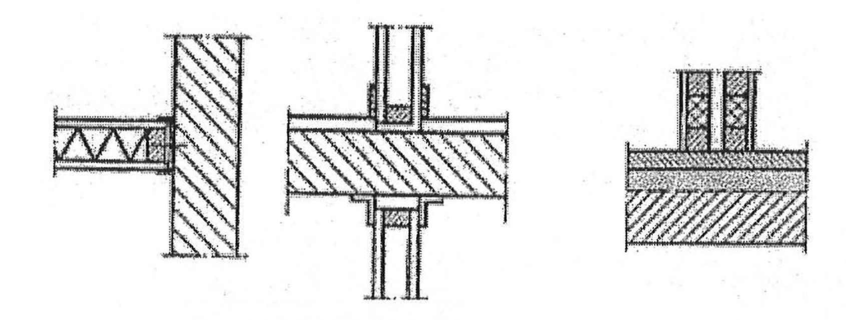


Unión de *elementos de entramado autoportante* y *elementos homogéneos*

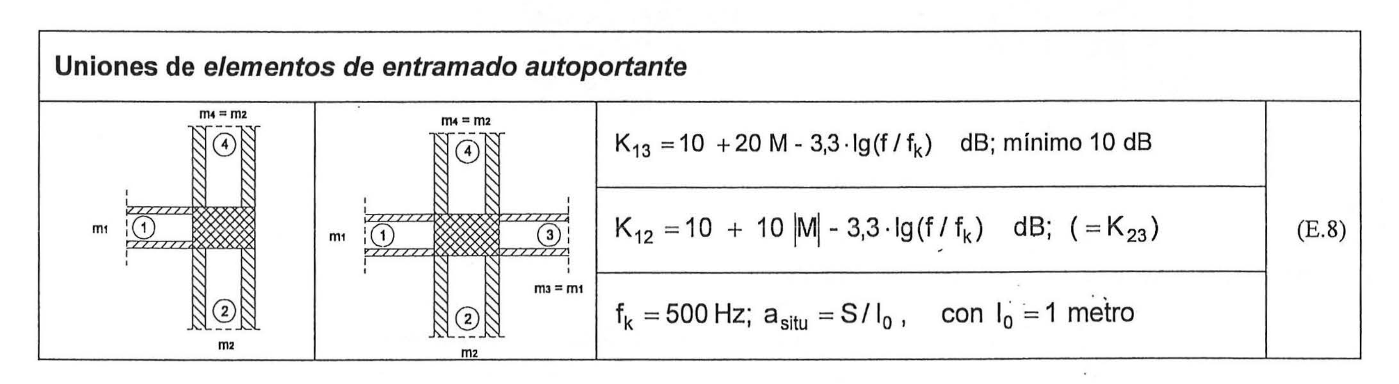


$K_{13} = 10 + 20\,M - 3{,}3 \cdot \lg(f / f_k)$ dB; mínimo 10 dB	(E.7)
$K_{24} = 3{,}0 + 14{,}1\,M + 5{,}7\,M^2$ dB; $(m_2 / m_1) > 3$; 0 dB/octava	
$K_{12} = 10 + 10\lvert M \rvert + 3{,}3 \cdot \lg(f / f_k)$ dB; $(= K_{23})$	
$f_k = 500$ Hz; $a_{ligero,\,situ} = S_{ligero} / l_0$, con $l_0 = 1$ metro	

EJEMPLOS

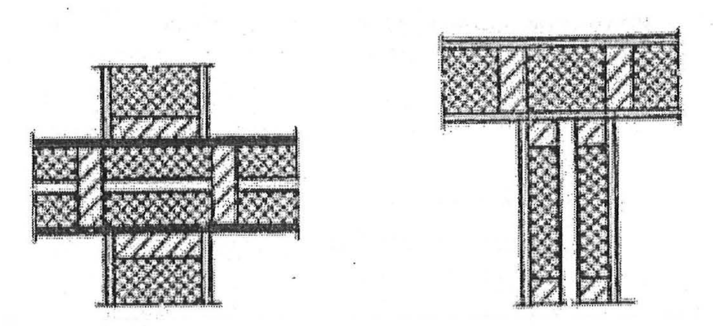


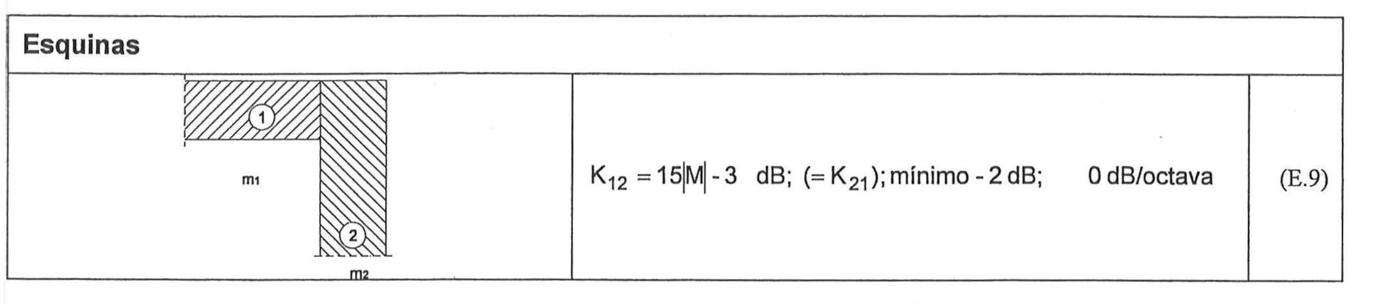
Uniones de *elementos de entramado autoportante*



$K_{13} = 10 + 20\,M - 3{,}3 \cdot \lg(f / f_k)$ dB; mínimo 10 dB	(E.8)
$K_{12} = 10 + 10\lvert M \rvert - 3{,}3 \cdot \lg(f / f_k)$ dB; $(= K_{23})$	
$f_k = 500$ Hz; $a_{situ} = S / l_0$, con $l_0 = 1$ metro	

EJEMPLOS





Esquinas		
	$K_{12} = 15\lvert M\rvert - 3$ dB; $(= K_{21})$; mínimo - 2 dB; 0 dB/octava	(E.9)

Cambio de espesor		
m1 (1) (2) m2	$K_{12} = 5M^2 - 5$ dB $(= K_{21})$; 0 dB/octava	(E.9)

8.4 ESTIMACIÓN DE LA DIFERENCIA DE NIVELES ESTANDARIZADA PONDERADA A ENTRE RECINTOS CON ELEMENTOS DE SEPARACIÓN TRADICIONALES (HORMIGÓN, PAREDES DE ALBAÑILERÍA) CON UNIONES RÍGIDAS

La diferencia de niveles estandarizada ponderada A entre dos recintos $D_{nT,A}$, se puede relacionar de *forma aproximada* con el índice global de reducción acústica, ponderado A, R_A, medido en el laboratorio de la pared de separación, mediante la siguiente expresión:

$$D_{nT,A} = R_A + 10\lg(\frac{0,32.V}{S}) - C \ dB \qquad (8.23)$$

donde: S es el área de la pared separadora común a los dos recintos, V el volumen del recinto receptor y C es la disminución del aislamiento debido a las transmisiones laterales, su valor varía de 0 a 10 dB, según las masas respectivas de las paredes, geometría y sistema constructivo. La ecuación (8.23) no tiene en consideración las transmisiones parásitas ni los errores de ejecución.

Para el cálculo de R_A en el caso de paredes simples se puede utilizar la ley de masa experimental del DB HR Protección frente al ruido del CTE, el catálogo de elementos constructivos del CTE, o valores de ensayos de laboratorio. Cuando sean paredes dobles se utiliza el catálogo de elementos constructivos anterior o ensayos de laboratorio. La figura 8.4 muestra los valores aproximados de la disminución del índice de reducción acústica para algunos tipos de uniones entre paredes.

Esquema de las uniones (Vista en planta)	Tipo de paredes	Disminución C dBA
	Paredes separadoras y laterales pesadas, homogéneas y de masas comparables. m' > 150 kg/m^2.	5
	Paredes separadoras y laterales pesadas, homogéneas y de masas comparables. m' > 150 kg/m^2. - Las paredes laterales están dobladas a base de espumas rígidas.	> 6
	Paredes separadoras y laterales pesadas, homogéneas y de masas comparables. m' > 150 kg/m^2. - Las paredes laterales están dobladas a base de lana mineral o espumas de poros abiertos de más de 3 cm de espesor.	≤ 4
	La pared separadora está formada por dos hojas pesadas separadas por una junta de dilatación. Las paredes laterales son pesadas con o sin doblado	= 0
	La pared separadora está formada por dos hojas pesadas separadas por una cámara de aire. Las paredes laterales son pesadas.	≥ 5
R2 R1	La pared separadora es de albañilería de poca masa. Las paredes laterales son pesadas y tienen un índice de reducción acústica mayor de 10 dB que el de la pared ligera.	= 0
	La pared separadora es de albañilería y pesada. Las paredes laterales son de albañilería y ligeras con uniones rígidas.	≥ 7
R1 R2	Las paredes laterales son tabiques ligeros flexibles. La pared separadora es pesada y tiene un índice de reducción acústica mayor de 10 dB que el de las paredes ligeras	≈ 5
	La pared separadora y las paredes laterales son ligeras y de dos hojas	≈ 5

Figura 8.4: Valores aproximados de la disminución del índice de reducción acústica para algunos tipos de uniones entre paredes.

8.5 – VALORES LÍMITE DE AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO ENTRE RECINTOS SEGÚN EL DB HR Protección frente al ruido del CTE

Se transcriben del texto de Abril de 2009.

Los elementos constructivos interiores de separación, así como las *fachadas*, las *cubiertas*, las *medianerías* y los suelos en contacto con el aire exterior que conforman cada *recinto* de un edificio deben tener, en conjunción con los elementos constructivos adyacentes, unas características tales que se cumpla:

a) En los recintos protegidos:
i) Protección frente al ruido generado en la misma unidad de uso:
- El índice global de reducción acústica, ponderado A, R_A, de la tabiquería no será menor que 33 dBA.

ii) Protección frente al ruido procedente de otras unidades de uso:
- El aislamiento acústico a ruido aéreo, $D_{nT,A}$, entre un recinto protegido y cualquier otro del edificio, colindante vertical u horizontalmente con él, que pertenezca a una unidad de uso diferente, no será menor que 50 dBA.

iii) Protección frente al ruido procedente de zonas comunes:
- El aislamiento acústico a ruido aéreo, $D_{nT,A}$, entre un recinto protegido y una zona común, colindante vertical u horizontalmente con él, siempre que no comparta puertas o ventanas, no será menor que 50 dBA. Cuando sí las compartan, el índice global de reducción acústica, R_A, de éstas, no será menor que 30 dBA y el índice global de reducción acústica, R_A, del muro no será menor que 50 dBA.

iv) Protección frente al ruido procedente de recintos de instalaciones y de recintos de actividad:
- El aislamiento acústico a ruido aéreo, $D_{nT,A}$, entre un recinto protegido y un recinto de instalaciones o un recinto de actividad, colindante vertical u horizontalmente con él, no será menor que 55 dBA.

Los valores mínimos de aislamiento acústico a ruido aéreo de protección frente al ruido procedente del exterior se analizarán en el tema siguiente.

b) En los recintos habitables:
i) Protección frente al ruido generado en la misma unidad de uso:
- El índice global de reducción acústica, ponderado A, R_A, de la tabiquería no será menor que 33 dBA.

ii) Protección frente al ruido procedente de otras unidades de uso:
- El aislamiento acústico a ruido aéreo, $D_{nT,A}$, entre un recinto habitable y cualquier recinto habitable colindante vertical u horizontalmente con él, que pertenezca a una unidad de uso diferente no será menor que 45 dBA.

iii) Protección frente al ruido procedente de zonas comunes:
- El aislamiento acústico a ruido aéreo, $D_{nT,A}$, entre un recinto habitable y una zona común, colindante vertical u horizontalmente con él, siempre que no comparta puertas o ventanas, no será menor que 45 dBA. Cuando sí las compartan y sean edificios de uso residencial o sanitario, el índice global de

reducción acústica, R_A, de éstas, no será menor que 20 dBA y el índice global de reducción acústica, R_A, del muro no será menor que 50 dBA.

iv) Protección frente al ruido procedente de recintos de instalaciones y de recintos de actividad:

- El aislamiento acústico a ruido aéreo, DnT,A, entre un recinto habitable y un recinto de instalaciones, o un recinto de actividad, colindantes vertical u horizontalmente con él, no será menor que 45 dBA.

c) En los recintos habitables y recintos protegidos colindantes con otros edificios:
El aislamiento acústico a ruido aéreo ($D_{2m,nT,Atr}$) de cada uno de los cerramientos de una medianería entre dos edificios no será menor que 40 dBA o alternativamente el aislamiento acústico a ruido aéreo ($D_{nT,A}$) correspondiente al conjunto de los dos cerramientos no será menor que 50 dBA.

Nota: El DB HR Protección frente al ruido para el diseño y dimensionado de los elementos constructivos, permite elegir entre las opciones simplificada y general.

BIBLIOGRAFÍA

[1] UNE-EN 12354-1:2000. Acústica en la edificación. Estimación de las características acústicas de las edificaciones a partir de las características de sus elementos. Parte 1: Aislamiento acústico del ruido aéreo entre recintos.

[2] Craik , R. J.M., Sound transmission through buildings using Statistical Energy Analysis. Gower Publishing Limited, England, 1996.

[3] Smith, P.W. (1979). Statistical models of coupled dynamical Systems and the transition from Peak to Sorong coupling. J. Acoust. Soc. Am **65**, 695-698

[4] Lyon, R.H; Maidanik, G. (1962). Power flow between linearly coupled oscillators. J. Acoust. Soc. Am **34**, 623-629.

[5] Lyon, R.H. (1975). Statistical energy analysis of dynamical systems, theory and applications. Massachusetts, USA. MIT Press.

[6] UNE-EN ISO 10848-1. Acústica. Medida en laboratorio de la transmisión por flancos del ruido aéreo y del ruido de impacto entre recintos adyacentes. Parte 1: Documento marco. Enero 2007. Esta Norma tiene las partes 2 y 3.

[7] DB HR Protección frente al ruido. Abril 2009.

9 LA PROTECCIÓN ACÚSTICA DE LA ENVOLVENTE DEL EDIFICIO FRENTE AL RUIDO EXTERIOR

9.1 INTRODUCCIÓN

En esta lección se estudian el comportamiento acústico de la envolvente del edificio, (fachadas, cubiertas y suelos en contacto con el aire exterior), que es la protección arquitectónica básica frente al ambiente exterior y las exigencias acústicas mínimas que tiene que cumplir para garantizar que los niveles sonoros de inmisión en los recintos sean los adecuados a su uso.

Las fachadas y cubiertas presentan tipologías muy variadas al tener que cumplir funciones muy diferentes y ser el resultado de la evolución de siglos, tanto de los materiales, como de los sistemas constructivos, de los cambios culturales y de las costumbres de los usuarios. Las mayores exigencias de confort, durabilidad, sostenibilidad y ahorro energético en los edificios han hecho surgir nuevas tipologías de envolventes más respetuosas con el medio ambiente.

9.2.- LAS FACHADAS

La fachada es el cerramiento arquitectónico por excelencia, es la parte visible de un edificio que cumple diferentes funciones. Desde el punto de vista del proyecto presenta el aspecto compositivo, de adaptación al entorno y de expresividad del edificio. Los materiales elegidos, la relación entre partes ciegas y los huecos definen su aspecto exterior. Debe garantizar la protección térmica, acústica, de iluminación, de estanqueidad, resistencia al fuego y de estabilidad para alcanzar unas condiciones de habitabilidad. Para garantizar lo anterior las fachadas adoptan diferentes tipologías, desde cerramientos monocapa a multicapas.

Según la terminología utilizada en el DB HR Protección frente al ruido del CTE, la fachada es el cerramiento perimétrico del edificio, vertical o con inclinación no mayor que 60° sobre la horizontal, que lo separa del exterior. Incluye tanto el muro de fachada como los huecos (puertas exteriores y ventanas). También define la fachada ligera, como una fachada continua y anclada a una estructura auxiliar, cuya masa por unidad de superficie es menor que 200 kg/m^2.

Las mayores exigencias de confort, durabilidad, sostenibilidad y ahorro energético en los edificios, han hecho aparecer nuevas tipologías de los cerramientos verticales o fachadas, que están unidas tanto al perfeccionamiento o mejora de los sistemas y materiales tradicionales, como a la aplicación de nuevas técnicas y componentes en la industria de la construcción.

Existe una gran variedad de tipologías de fachadas. Históricamente el muro macizo tradicional cumplía sus funciones portante y de aislamiento térmico y acústico. A finales del siglo XIX se introdujo el concepto de cavity wall, que proponía la separación física de las dos hojas del muro. El amplio desarrollo de estructuras porticadas de acero y hormigón armado facilitó el desarrollo de fachadas de dos hojas.

En España, en un gran número de edificios residenciales, las fachadas no son ventiladas y son de ladrillos, insertadas en estructuras porticadas. La generalidad de las fachadas están formadas por dos hojas (fachada convencional). La hoja exterior es de medio pie (o un pie) de ladrillo cerámico perforado, visto o enfoscado, está apoyada de manera semivolada en los dos tercios del ancho de la hoja; la hoja interior es de ladrillo hueco (o un entramado autoportante de yeso laminado) y no tiene contacto con la hoja exterior. En la cámara, no ventilada, entre ambas hojas se introduce un material aislante térmico y una barrera de vapor. A veces se sustituye la hoja exterior por placas de piedra natural o artificial, o por piezas cerámicas, o por bloques de hormigón, igualmente se producen otras combinaciones de la hoja interior. Según el DB HS1 del CTE, todas las cámaras con un área de ventilación efectiva menor de 120 cm^2 por cada 10 m^2 de fachada entre forjados, se consideran fachadas no ventiladas.

En la actualidad, la fachada convencional evoluciona hacia nuevas tipologías como son las fachadas ventiladas y las fachadas prefabricadas. Las fachadas ventiladas muestran una serie de ventajas desde el punto de vista del aislamiento térmico de la fachada de los recintos. La fachada ventilada es un cerramiento compuesto por diversas hojas, la exterior es una hoja de relativo poco espesor, con juntas total o parcialmente abiertas y separada del resto por una cámara ventilada donde se sitúa el aislamiento térmico adosado al muro interior. Según el DB HS1 del CTE, las cámaras de aire ventiladas tienen que tener un espesor entre 3 y 10 cm, con un área de ventilación efectiva mayor de 120 cm^2 por cada 10 m^2 de fachada entre forjados, y aberturas de ventilación con una anchura mayor de 5 mm, repartidas al 50% entre la parte superior y la inferior de un paño entre forjados.

En los últimos años la construcción de fachadas ventiladas en los edificios de uso residencial ha crecido rápidamente, debido a sus ventajas compositivas y constructivas. La hoja exterior suele ser poco pesada, puede ser de materiales muy diferentes y se cuelga de la hoja interior o de entramados secundarios situados entre los forjados. En sus comienzos, la hoja interior era de ladrillo perforado, pero posteriormente se ha aligerado mediante utilización un sistema multicapas formada por tableros de yeso laminado, mortero reforzado, etc. en cuyo interior se coloca lana de roca, poliestileno expandido, con hoja intermedia de chapas de acero galvanizado, etc.

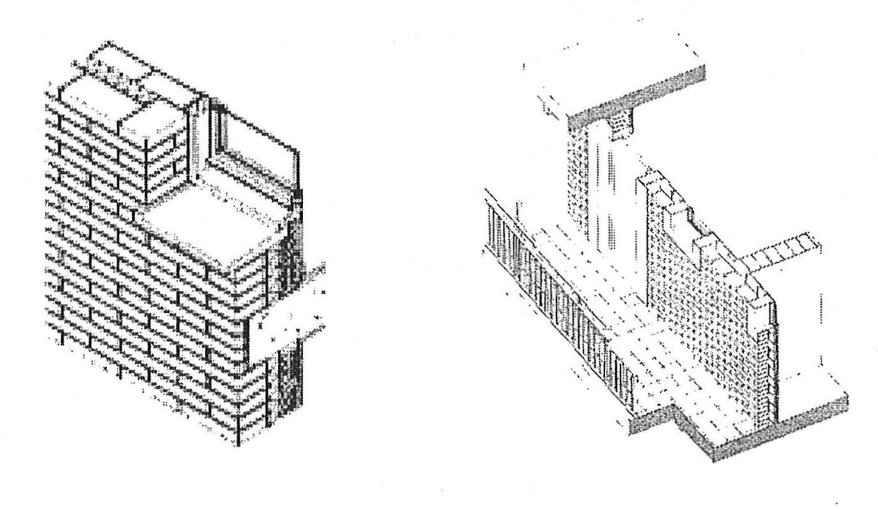


Figura 9.1: Esquema de fachadas convencionales.

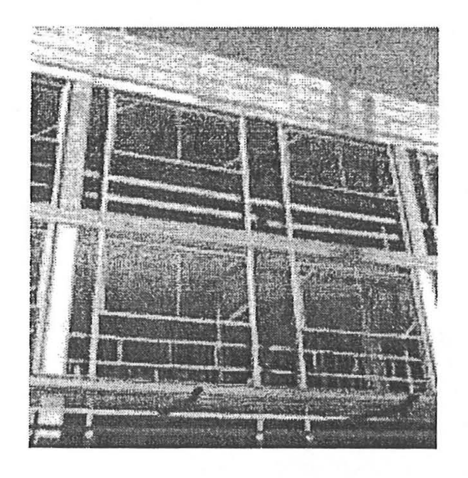
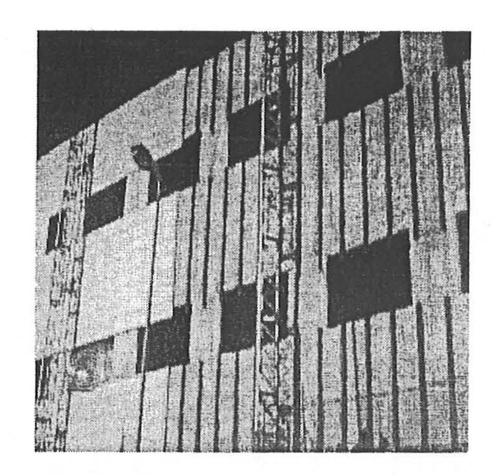
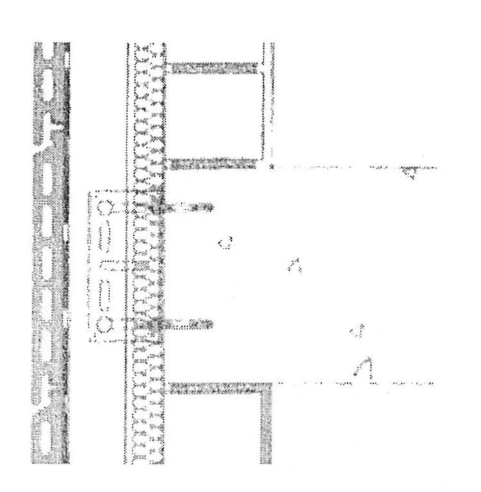



Figura 9.2: Ejemplos de realización de fachadas ventiladas




La hoja exterior es un aplacado cerámico

Fachadas rehabilitadas. La hoja exterior es de tablero de resinas sintéticas

Figura 9.3: Ejemplos de fachadas ventiladas.

Desde la perspectiva del aislamiento acústico a ruido aéreo de las fachadas de los recintos, la transición de las fachadas convencionales a las fachadas ventiladas, bien calculadas y realizadas, no debe afectar de forma importante al aislamiento global a ruido aéreo de las mismas, pues en general, el cerramiento del hueco de fachada es la parte constructiva que tiene menor índice de reducción acústica, y en consecuencia es la que más influye en el aislamiento acústico a ruido aéreo de la fachada del recinto.

El aislamiento a ruido aéreo mínimo de la envolvente del edificio (fachadas, cubiertas y suelos en contacto con el aire exterior) dependerá del nivel de ruido exterior de la zona donde se ubica el edificio y del uso del edificio. Este valor mínimo debe garantizar que el nivel inmisión de ruido en el interior de los recintos del edificio, sea el adecuado para que se desarrollen las actividades en los diferentes recintos sin riesgo, daño o molestia para las personas, ni interfieran en el desarrollo de sus actividades.

La legislación acústica en la edificación de los diferentes países suele proporcionar unos catálogos de los elementos constructivos comunes en cada país, indicando sus propiedades higrotérmicas y acústicas.

Un método indirecto de reducción del nivel de inmisión del ruido en los recintos de los edificios es mediante la realización de galerías, tribunas y miradores en los edificios.

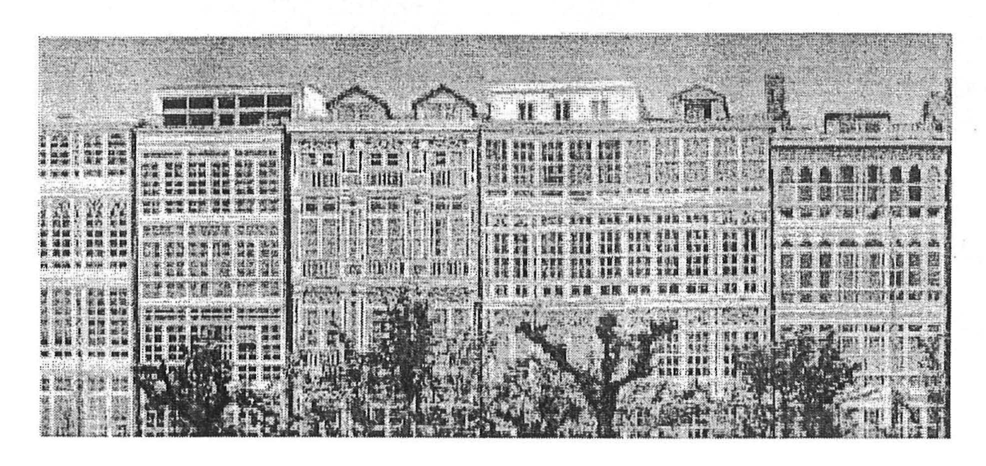


Figura 9.4. Galerías en la ciudad de La Coruña

9.3 - EL AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO DE LAS FACHADAS DE LOS RECINTOS

Las fachadas de los recintos, junto con sus elementos constructivos adyacentes, deben tener un aislamiento acústico a ruido aéreo mínimo según el uso del recinto y los niveles sonoros en la zona donde está ubicado el edificio. Los niveles sonoros que inciden sobre la fachada del recinto dependerán de las fuentes de ruido, generalmente el tráfico rodado, tipos de vías y su distancia al edificio, altura del mismo, naturaleza continua o discreta de la trama urbana, exposición directa o indirecta de la fachada, etc.

Cada una de las cuatro caras que, como mínimo, tiene un edificio debería tratarse por separado, ya que cada una de ellas suele estar expuesta a niveles sonoros diferentes. En la práctica se elige como nivel sonoro para las fachadas de los recintos del edificio, el nivel sonoro incidente más elevado. El arquitecto ha de tener esto en cuenta desde el momento del proyecto. Lo habitual en la legislación acústica de los países de nuestro entorno es definir varios tipos de exposición sonora en los edificios, según los niveles sonoros continuos equivalentes, medidos a 2 m delante de la fachada en el intervalo horario de día.

A efectos del aislamiento acústico a ruido aéreo frente al exterior de un recinto, se entiende por fachada el conjunto del cerramiento del edificio visto desde el propio recinto, partes ciegas, acristaladas practicables o no incluidas y la parte de la cubierta que no sea la correspondiente a la última planta.

El DB HR Protección frente al ruido del CTE, establece unos valores del aislamiento acústico a ruido aéreo $D_{2m,nT,Atr}$ entre un recinto protegido y el exterior, en función del uso del edificio y del nivel sonoro continuo equivalente día L_d de la zona donde se ubique el edificio. Define la Diferencia de niveles estandarizada, ponderada A, en fachadas, en cubiertas y en suelos en contacto con el aire exterior para ruido de automóviles, $D_{2m,nT,Atr}$ como la valoración global, en dBA, de la diferencia de niveles estandarizada de una fachada, de una cubierta o un suelo en contacto con el aire

exterior, $D_{2m,nT}$, para un ruido exterior de automóviles. Se determina mediante la expresión:

$$D_{2m,nT,Atr} = -10.\lg \sum_{i=1}^{n} 10^{(L_{Atr,i} - D_{2m,nT,i})/10} \quad [dBA] \qquad (9.1)$$

donde

$D_{2m,nT,i}$ es la diferencia de niveles estandarizada, en la banda de frecuencia i, [dB]; $L_{Atr,i}$ el valor del espectro normalizado del ruido de automóviles, ponderado A, en la banda de frecuencia i, en dBA; i recorre todas las bandas de frecuencia de tercio de octava de 100 Hz a 5kHz.

En el DB HR Protección frente al ruido en el caso de Protección frente al ruido procedente del exterior se indica que:

- El aislamiento acústico a ruido aéreo, $D_{2m,nT,Atr}$, entre un recinto protegido y el exterior debe ser al menos el que se indica en la Tabla 9.1, en función del uso del edificio y de los valores del índice de ruido día, Ld, definido en el Anexo I del R D 1513/2005, de 16 de diciembre, de la zona donde se ubica el edificio.

L_d dBA	Aislamiento acústico a ruido aéreo, $D_{2m,nT,Atr}$, en dBA, entre un recinto protegido y el exterior			
	Uso del edificio			
	Residencial y hospitalario		Cultural, sanitario[1], docente, administrativo y religioso	
	Dormitorios	Estancias	Estancias	Aulas
$L_d \leq 60$	30	30	30	30
$60 < L_d \leq 65$	32	30	32	30
$65 < L_d \leq 70$	37	32	37	32
$70 < L_d \leq 75$	42	37	42	37
$L_d > 75$	47	42	47	42

(1) En edificios de uso no hospitalario (edificios de asistencia sanitaria de carácter ambulatorio, como despachos médicos, consultas, áreas destinadas al diagnóstico y tratamiento, etc.)

Tabla 9.1: Valores de aislamiento acústico a ruido aéreo, $D_{2m,nT,Atr}$, en dBA, entre un recinto protegido y el exterior, en función del índice de ruido día, L_d.

- El valor del índice de ruido día, L_d, puede obtenerse en las administraciones competentes o mediante consulta de los mapas estratégicos de ruido. En el caso de que un recinto pueda estar expuesto a varios valores de L_d , como por ejemplo un recinto en esquina, se adoptará el mayor valor.

- Cuando no se disponga de datos oficiales del valor del índice de ruido día, L_d, se aplicará el valor de 60 dBA para el tipo de área acústica relativo a sectores de territorio con predominio de suelo de uso residencial. Para el resto de áreas acústicas, se aplicará lo dispuesto en las normas reglamentarias de desarrollo de la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido en lo referente a la zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas.(Ver Nota).

- Cuando se prevea que algunas fachadas, tales como fachadas de patios de manzana cerrados o patios interiores, así como fachadas exteriores en zonas o entornos tranquilos, no van a estar expuestas directamente al ruido de automóviles, aeronaves, de actividades industriales, comerciales o deportivas, se considerará un índice de ruido día, L_d, 10 dBA menor que el índice de ruido día de la zona.
- Cuando en la zona donde se ubique el edificio el ruido exterior dominante sea el de aeronaves según se establezca en los mapas de ruido correspondientes, el valor de aislamiento acústico a ruido aéreo, $D_{2m,nT,Atr}$, obtenido en la Tabla 9.2 se incrementará en 4 dBA.

NOTA: En el resto de áreas acústicas, se adoptará el L_d establecido como objetivo de calidad en el RD 1367/2007. Tabla A del anexo II del RD.
Un área acústica es aquel ámbito del territorio, delimitado por la administración competente, que tiene un mismo objetivo de calidad acústica.

Tipo de área acústica		**Índice de ruido** L_d, dBA
e	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso sanitario, docente y cultural que requiera una especial protección contra la contaminación acústica	**60**
d	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso terciario distinto del contemplado en c.	**70**
c	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso recreativo y de espectáculos.	**73**
b	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso industrial	**75**
f	Sectores del territorio afectados a sistemas generales de infraestructuras de transporte, u otros equipamientos públicos que los reclamen. (1)	Sin determinar
(1) En estos sectores del territorio se adoptarán medidas adecuadas de prevención de la contaminación acústica, en particular mediante la aplicación de las tecnologías de menor incidencia acústica de entre las mejoras técnicas disponibles, de acuerdo con el apartado a), del artículo 18.2 de la Ley 37/2003, de 17 de noviembre.		

El DB HR Protección frente al ruido del CTE, para el diseño y dimensionado de los elementos constructivos, permite elegir entre dos opciones, la simplificada o la general. A continuación se muestran las condiciones mínimas de la opción simplificada.

Condiciones mínimas de aislamiento acústico a ruido aéreo, $D_{2m,nT,Atr}$, en dBA, de las *fachadas*, las *cubiertas* y los suelos en contacto con el aire exterior

1 En la tabla 9.2 se expresan los valores mínimos que deben cumplir los huecos y la parte ciega de la fachada, la cubierta o el suelo en contacto con el aire exterior y, en el caso de que los hubiera, los aireadores y las cajas de persiana, en función de los valores límite de aislamiento acústico entre un recinto protegido y el exterior indicados en la tabla 9.1 y del porcentaje de huecos expresado como la relación entre la superficie del hueco y la superficie total de la fachada vista desde el interior de cada recinto protegido.

2 El parámetro acústico que define los componentes de una *fachada*, una *cubierta* o un suelo en contacto con el aire exterior es el índice global de reducción acústica, ponderado A, para ruido exterior dominante de automóviles o de aeronaves, $R_{A,tr}$, de la parte ciega y de los elementos que forman el hueco.

3 Este índice, $R_{A,tr}$, caracteriza al conjunto formado por la ventana, la caja de persiana y el aireador si lo hubiera.

En el caso de que el aireador no estuviera integrado en el hueco, sino que se colocara en el cerramiento, debe aplicarse la opción general.

4 En el caso de que la fachada del recinto protegido fuera en esquina o tuviera quiebros, el porcentaje de huecos se determina en función de la superficie total del perímetro de la fachada vista desde el interior del recinto.

9.4.- MÉTODO DE CÁLCULO DEL AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO EN FACHADAS DE RECINTOS SEGÚN LA NORMA UNE-EN 12354-3.

La Norma UNE-EN 12354-3. (Enero 2001). Acústica de la edificación. Estimación de las características acústicas de las edificaciones a partir de las características de sus elementos. Parte 3: Aislamiento acústico a ruido aéreo contra ruido del exterior, especifica un modelo de cálculo para estimar el aislamiento acústico o la diferencia de nivel de presión acústica de una fachada o de cualquier otra superficie externa de un edificio. El cálculo se basa en el índice de reducción acústica de los distintos elementos que componen la fachada e incluye tanto transmisiones directas como indirectas. De los cálculos se obtienen resultados que se corresponden aproximadamente con los resultados de las mediciones in situ según la norma UNE- EN ISO 140 -5. Los cálculos se pueden realizar por bandas de frecuencia o por índices globales.

El modelo está basado en la experiencia en la predicción para viviendas; también podrían aplicarse a otros tipos de edificios siempre que los sistemas de construcción y las dimensiones de los elementos de construcción no sean muy diferentes a los que se encuentran en los edificios de viviendas.

La fachada en general consta de diferentes sistemas constructivos y la transmisión acústica a su través es debida a la transmisión acústica de cada uno de sus componentes. En los cálculos se suele considerar que la transmisión acústica de cada elemento constructivo es independiente de las demás. Se considera que los campos acústicos exteriores incidentes sobre las fachadas de los recintos son difusos. En primer lugar se

Nivel límite exigido (Tabla 9.1) $D_{2m,nT,Atr}$ dBA	Parte ciega (1) 100 % R_{Atr} dBA	Parte ciega (1) ≠ 100 % R_{Atr} dBA	Huecos Porcentaje de huecos $R_{A,tr}$ de los componentes del hueco(2) dBA				
			Hasta 15 %	De 16 a 30%	De 31 a 60%	De 61 a 80%	De 81 a 100%
$D_{2m,nT,Atr} = 30$	33	35	26	29	31	32	33
		40	25	28	30	31	
		45	25	28	30	31	
$D_{2m,nT,Atr} = 32$	35	35	30	32	34	34	35
		40	27	30	32	34	
		45	26	29	32	33	
$D_{2m,nT,Atr} = 34$(1)	36	40	30	33	35	36	36
		45	29	32	34	36	
		50	28	31	34	35	
$D_{2m,nT,Atr} = 36$(1)	38	40	33	35	37	38	38
		45	31	34	36	37	
		50	30	33	36	37	
$D_{2m,nT,Atr} = 37$	39	40	35	37	39	39	39
		45	32	35	37	38	
		50	31	34	37	38	
$D_{2m,nT,Atr} = 41$(1)	43	45	39	40	42	43	43
		50	36	39	41	42	
		55	35	38	41	42	
$D_{2m,nT,Atr} = 42$	44	50	37	40	42	43	44
		55	36	39	42	43	
		60	36	39	42	43	
$D_{2m,nT,Atr} = 46$(1)	48	50	43	45	47	48	48
		55	41	44	46	47	
		60	40	43	46	47	
$D_{2m,nT,Atr} = 47$	49	55	42	45	47	48	49
		60	41	44	47	48	
$D_{2m,nT,Atr} = 51$(1)	53	55	48	50	52	53	53
		60	46	49	51	52	

(1) Los valores de estos niveles límite se refieren a los que resultan de incrementar 4 dBA los exigidos en la tabla 9.1, cuando el ruido exterior dominante es el de aeronaves.

(2) El índice R_{Atr} de los componentes del hueco expresado en la tabla 9.2 se aplica a las ventanas que dispongan de aireadores, sistemas de microventilación o cualquier otro sistema de abertura de admisión de aire con dispositivos de cierre en posición cerrada.

Tabla 9.2 Parámetros acústicos de fachadas, cubiertas y suelos en contacto con el aire exterior de recintos protegidos

calcula el índice de reducción acústica aparente de la fachada del recinto para campo difuso R′, y a partir de este valor se deducen las demás magnitudes.

El índice de reducción acústica aparente, R′, se obtiene considerando las transmisiones directas e indirectas. En la figura 9.5 se muestran los caminos de transmisión acústica desde el exterior al interior de un recinto.

La transmisión por flancos comprende todos los caminos indirectos, incluidos los correspondientes a elementos de fachada que no pertenecen al recinto.

$$R' = -10.\lg\left(10^{-0,1R_m} + \sum_{F=f=1}^{n} 10^{-0,1R_{Ff}} + \sum_{f=1}^{n} {}^{-0,1R_{Df}} + \sum_{F=1}^{n} 10^{-0,1R_{Fd}} + \frac{A_0}{S}\sum_{e_i,Si} 10^{-0,1D_{n,e_i i}}\right) \quad dB \qquad (9.2)$$

R_m es el índice global de reducción acústica del elemento mixto, en dB. n, es el número de caminos indirectos, $A_0 = 10\ m^2$. Para tomas de aire o respiraderos sin tratamiento acústico se considera:

$$D_{n,e} = -10.\lg\left(\frac{S_0}{10}\right) \quad dB \qquad (9.3)$$

donde S_0 es el área del respiradero, en m^2.

Las transmisiones indirectas respecto al aislamiento a ruido aéreo de las fachadas son pequeñas. Sin embargo cuando los elementos rígidos de la fachada (hormigón, ladrillos) están conectados a elementos rígidos del recinto (forjados, particiones) hay que incluirlas en los cálculos, en especial cuando las exigencias de aislamiento a ruido aéreo de las fachadas sean elevadas. En estas situaciones las transmisiones indirectas pueden estimarse en - 2 dB, que se restan del índice de reducción acústica global del elemento de fachada rígido y pesado.

La diferencia de nivel normalizada de la fachada de un recinto depende de su índice de reducción acústica aparente vista desde el interior R′, la influencia de la forma de la fachada y las dimensiones del recinto.

$$D_{2m,nT} = R' + \Delta L_{fs} + 10\lg\frac{V}{6T_0 S} = R' + \Delta L_{fs} + 10\lg\frac{V}{S} - 5 \qquad dB \qquad (9.4)$$

ΔL_{fs} es la diferencia de nivel por la forma de la fachada, en dB; V, el volumen del recinto receptor en m^3; S él área total de la fachada, vista desde el interior del recinto, en m^2 y T_0 el tiempo de reverberación de referencia; para viviendas es $T_0 = 0,5$ s.

La expresión exterior puede utilizarse para determinar las propiedades de aislamiento a ruido aéreo de la fachada en bandas de frecuencia, basándose en los índices de aislamiento acústico de los elementos de construcción en bandas de frecuencia. También puede ser utilizada con los valores globales. Por ejemplo, cuando predominan el ruido de automóviles o el ruido de aeronaves, la magnitud del aislamiento global es $D_{2m,nT,Atr.}$ =. $D_{2m,nT,w} + C_{tr\ 100\text{-}5000}$. La ecuación (9.4) nos muestra la influencia del volumen del recinto receptor y del área de la fachada. Por ejemplo, si duplicamos el área de la fachada, o el volumen del recinto se disminuye a la mitad, el índice de reducción acústica global aparente de la fachada tiene que aumentar en 3 dB.

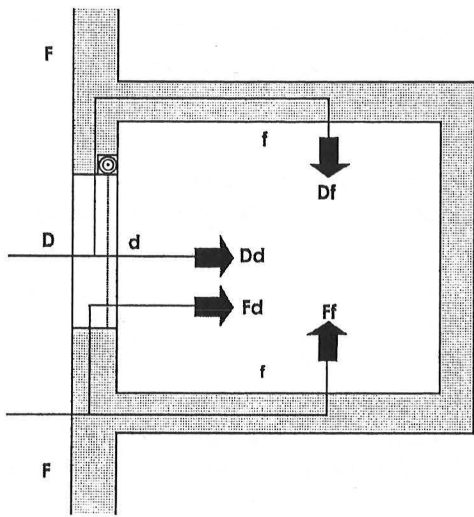


Figura 9.5: Vías de transmisión acústica desde el exterior al interior de un recinto.

En el caso de utilizar valores globales, como son los del DB HR Protección frente al ruido de la legislación española, la ecuación 9.4 se puede escribir para obtener la Diferencia de nivel estandarizada, ponderada A en fachadas, para ruido de tráfico

$$D_{2m,nT,Atr} = R'_{Atr} + \Delta L_{fs} + 10\lg\frac{V}{6T_0 S} = R'_{A,tr} + \Delta L_{fs} + 10\lg\frac{V}{S} - 5 \qquad dBA \quad (9.5)$$

9.5.- EL EFECTO DE LA FORMA DE LA FACHADA EN SU AISLAMIENTO ACUSTICO A RUIDO AÉREO.

El efecto de la forma de la fachada de un recinto puede disminuir o aumentar la trasmisión acústica. Las correcciones por la forma de la fachada ΔL_{fs} pueden variar de – 1 a + 7 dB. Los efectos positivos los producen los tratamientos absorbentes de los sofitos, existencia de balcones antepechados, etc. y los negativos a las reflexiones del sonido en sofitos sin absorción acústica. Las galerías casi cerradas, con respiraderos en su parte superior con altura de la línea de mira mayores de 2,5 m y tratamiento de elevada absorción acústica en el techo originan mejoras de aproximadamente + 6 dB. El anexo C de la Norma UNE – EN 12354-3 Influencia de la forma de la fachada, muestra ejemplos de la diferencia de niveles sonoros debido a la forma de la fachada ΔL_{fs}. La figura 9.6 muestra los parámetros más influyentes en la diferencia de niveles sonoros debido a la forma de la fachada: absorción acústica del sofito, altura de la línea de mira, plano de la fachada y fuente acústica.

La forma de la fachada se indica mediante una sección vertical de la galería balconada o terraza, Tabla 9.3. Si estas pueden cerrarse, es decir si no hay una abertura importante, esto se reflejará en la sección transversal, en caso contrario no. La absorción se indica mediante un coeficiente ponderado de absorción global α_w según la norma EN ISO 11654 como $\leq 0,3$; 0,6 ó $\geq 0,9$. El efecto para valores intermedios se puede deducir por interpolación; $\alpha_w \geq 0,9$ se aplica también si no hay ninguna superficie reflectante sobre la fachada considerada. La dirección del sonido incidente se caracteriza por la altura de la

línea de mira desde la fuente hasta el plano de la fachada; la posición de la fuente que es relevante es la que se traduce en una menor altura.

En la figura 9.7 se muestran para algunos casos la dependencia con la frecuencia, en bandas de octava, de la diferencia de nivel debida a la forma de las fachadas con relieve. En la figura, baja significa que la línea de mira es inferior a 1,5 m y alta, que la línea de mira es mayor de 2,5 m.

ΔL_{fs} dB	1 plano de fachada			2 galería			3 galería			4 galería			5 galería		
absorción del tejado (α_w) ⇒	no se aplica			≤0,3	0,6	≥0,9	≤0,3	0,6	≥0,9	≤0,3	0,6	≥0,9	≤0,3	0,6	≥0,9
línea de mira sobre la fachada: <1,5 m	0			-1	-1	0	-1	-1	0	0	0	1	no se aplica		
(1,5-2,5) m	0			no se aplica			-1	0	2	0	1	3			
>2,5 m	0						1	1	2	2	2	3	3	4	6

	6 balconada			7 balconada			8 balconada			9 terraza					
										barandilla abierta			barandilla cerrada		
absorción del tejado (α_w) ⇒	≤0,3	0,6	≥0,9	≤0,3	0,6	≥0,9	≤0,3	0,6	≥0,9	≤0,3	0,6	≥0,9	≤0,3	0,6	≥0,9
línea de mira sobre la fachada: <1,5 m	-1	-1	0	0	0	1	1	1	2	1	1	1	3	3	3
(1,5-2,5) m	-1	1	3	0	2	4	1	1	2	3	4	5	5	6	7
>2,5 m	1	2	3	2	3	4	1	1	2	4	4	5	6	6	7

Tabla 9.3: Diferencia de niveles sonoros debido a la forma de la fachada para las diferentes formas de la fachada y distintas orientaciones de la fuente acústica

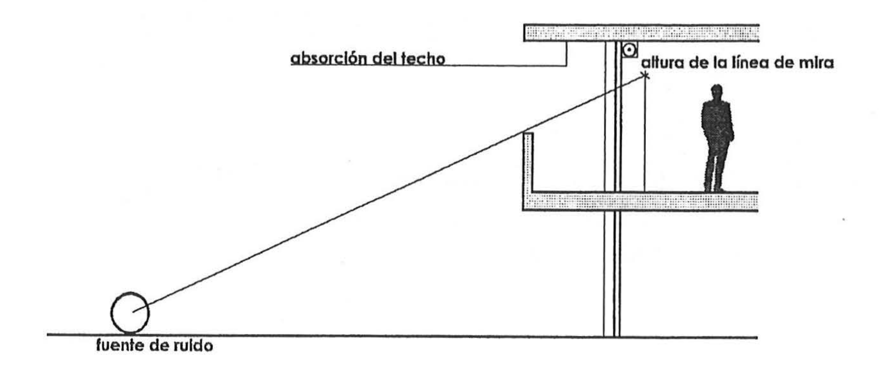


Figura 9.6. Parámetros relevantes en la diferencia de niveles sonoros debido a la forma de la fachada

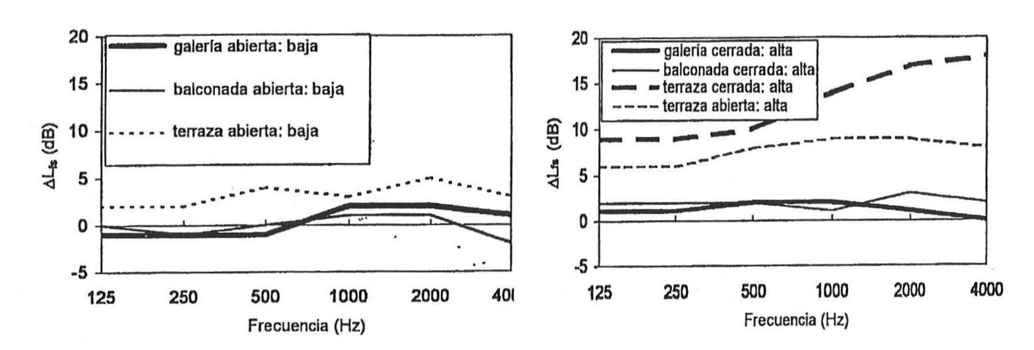


Figura 9.7: Diferencia de nivel sonoro debido a la forma de las fachadas con relieve en función de la frecuencia en bandas de octava.

9.6.- ESTIMACIÓN DE LOS NIVELES SONOROS EN EL INTERIOR DE UN RECINTO ORIGINADOS POR EL RUIDO EXTERIOR

El nivel acústico en el interior del recinto puede estimarse a partir del nivel de presión acústica en el exterior medido o calculado y de la diferencia de nivel acústico de la fachada.

Como la diferencia de nivel se refiere a una posición situada a 2 m de la fachada, según la Norma EN ISO 140-5, el nivel de presión acústica en el exterior debe ser el nivel en esa posición. Si el nivel de presión acústica en el exterior está dado en otra posición o situación, debería deducirse el nivel a 2 m a partir de él. Podría deducirse, por ejemplo, a partir del nivel de presión acústica (sin el edificio) teniendo en cuenta la reflexión en la fachada; para una fachada plana esto se traduce en un aumento del nivel de 3 dB en todas las bandas de frecuencia.

El nivel acústico en el interior, normalizado a una absorción de 10 m^2 es:

$$L_{2,n} = L_{1,2m} - D_{2m,n} \quad \text{dB} \tag{9.6}$$

$L_{2,n}$ es el nivel de presión acústica medio en el recinto receptor, normalizado a una absorción acústica de 10 m^2;
$L_{1,2m}$ es el nivel de presión acústica en el exterior a 2 m de la fachada, según la EN ISO 140-5; $D_{2m,n}$ es la diferencia de nivel normalizada.

El nivel de presión acústica en el interior normalizado a un tiempo de reverberación de 0,5 s es:

$$L_{2,nT} = L_{1,2m} - D_{2m,nT} \text{ dB} \qquad (9.7)$$

$L_{2,nT}$ es el nivel de presión acústica medio en el recinto receptor, estandarizado a un tiempo de reverberación de 0,5 s;
$D_{2m,nT}$ es la diferencia de nivel estandarizada.

En función del índice de reducción acústica aparente se puede escribir

$$L_{2,nT} = L_{1,2m} - R' - 10.\lg\frac{0,16V}{T_0 S} = L_{1,2m} - R' - 10.\lg\frac{0,32V}{S} \quad dB, T_0 = 0,5s \qquad (9.8)$$

En situaciones en que la fachada no sea plana, como ventanas con grandes vanos o aberturas, una habitación que hace esquina o una habitación bajo tejado, la diferencia de nivel de presión acústica relevante debería incluir la transmisión acústica a través de todas las partes de la fachada en correspondencia a una posición de referencia, según la siguiente interpretación: si la fachada no es plana, se tomará como área la suma de todas las partes de la misma, tal y como se ven desde dentro, siempre que el sonido incidente sobre todas ellas sea el mismo. Si esto no se cumple, cada parte de la fachada con un sonido incidente homogéneo debe tratarse de forma separada. Si las diferentes partes de la fachada total pueden tener diferentes niveles acústicos, como ventanas con grandes vanos, una habitación que hace esquina o una habitación bajo el tejado, es posible considerar estas partes separadamente o combinadas como la envolvente total del recinto receptor, dependiendo de los requisitos y de la situación de medición prescrita (tipo de fuente, posición de la fuente, posición del micrófono exterior). En el último caso los resultados de los cálculos para cada parte deben combinarse teniendo en cuenta los niveles acústicos en el exterior de cada parte, relativos a una posición (de micrófono) de referencia definida para mediciones in situ.

EJERCICIO

En una calle de una ciudad los niveles sonoros durante el intervalo horario de día, a 2 metros de la fachada de un edificio son $L_{1,2m}$ dB. Se ha medido la diferencia de niveles estandarizada de la fachada de un dormitorio $D_{ls,2m,nT}$ en un edificio situado en esa calle. Calcúlense los niveles de presión acústica medio global en el dormitorio L_2 en dB y en dB ponderados A.

Frecuencia central, Hz	125	250	500	1k	2k	4 k
$L_{1,2m}$, dB	72	69	65	64	60	55
$D_{ls,2m,nT}$, dB	24,2	21,6	22,0	22,4	30,9	32,3

9.7.- EJEMPLOS DE AISLAMIENTO A RUIDO AÉREO DE FACHADAS DE RECINTOS HABITABLES PROTEGIDOS

Las NBE de los años setenta fueron un avance en la calidad de los edificios respecto a la situación anterior y generalizó el uso de vidrios dobles con sus consiguientes mejoras térmica y acústica en los edificios. La limitación de la demanda energética de los edificios que impone el CTE obliga a mejoras la calidad de las ventanas y de los cajones de persiana, por lo que en un gran número de situaciones, en zonas no excesivamente ruidosas, con la correcta elección del vidrio se podrán cumplir las exigencias de aislamiento acústico a ruido aéreo de las fachadas de los recintos.

A continuación se expondrán los resultados de diferentes mediciones realizadas in situ de las fachadas de recintos, mediante la aplicación de la Norma UNE-EN ISO 140-5.

En la figura 9.10 se muestra la mejora producida del aislamiento acústico a ruido aéreo de la fachada de seis dormitorios en los que se colocó una junta elástica en el perímetro de las hojas de las ventanas y el cerco para disminuir la permeabilidad al aire. Los datos geométricos medios de los dormitorios son: volumen 35 m^3, área de la fachada 15 m^2 y el hueco de las ventanas 1,9 m^2. La parte ciega de la fachada era de fábrica de citara de ladrillo cerámico perforado, cámara y tabique. Las ventanas eran de carpintería de madera, apertura abatible, vidrio sencillo de espesor 5 mm y con un cajón de persiana prefabricado. La mejora global es de 3 dB.

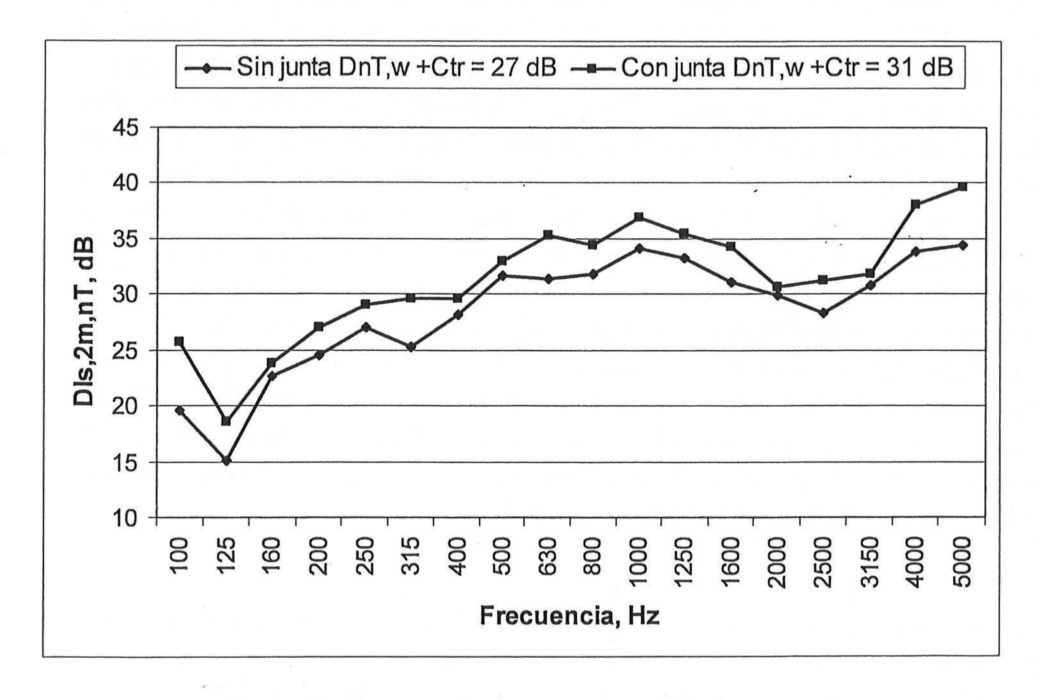


Figura 9.10: Efecto de la colocación de unas juntas elásticas en las hojas de las ventanas

La figura 9.11 muestra los resultados medidos in situ de las fachadas de 24 dormitorios con ventanas de carpintería de aluminio sin clasificar, con cajón de persiana de obra, sistema de apertura deslizante y vidrios sencillos, la mitad con vidrios de 4 mm y el resto de 5 mm. Los datos geométricos medios de los dormitorios son: volumen 25 m^3, área de la fachada 11 m^2 y el hueco de las ventanas 1,5 m^2. La parte ciega de la fachada era de fábrica de citara de ladrillo cerámico perforado, cámara y tabique. Los edificios

estaban construidos antes de 1982 y presentan un deficiente aislamiento térmico y acústico.

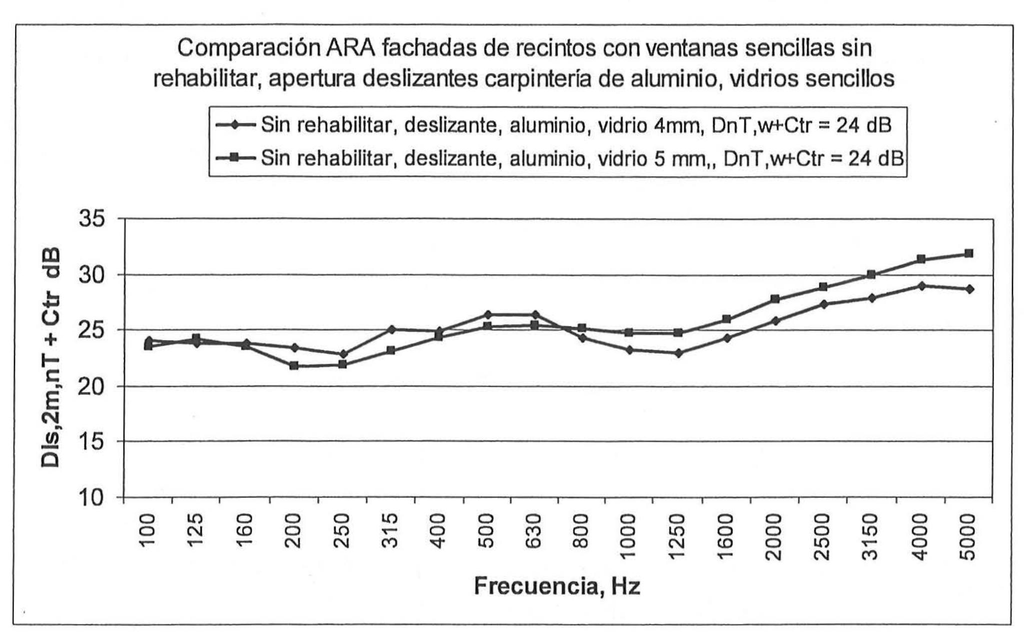


Figura 9.11: Aislamiento a ruido aéreo de fachadas de recintos con ventanas de apertura deslizante y vidrios sencillos.

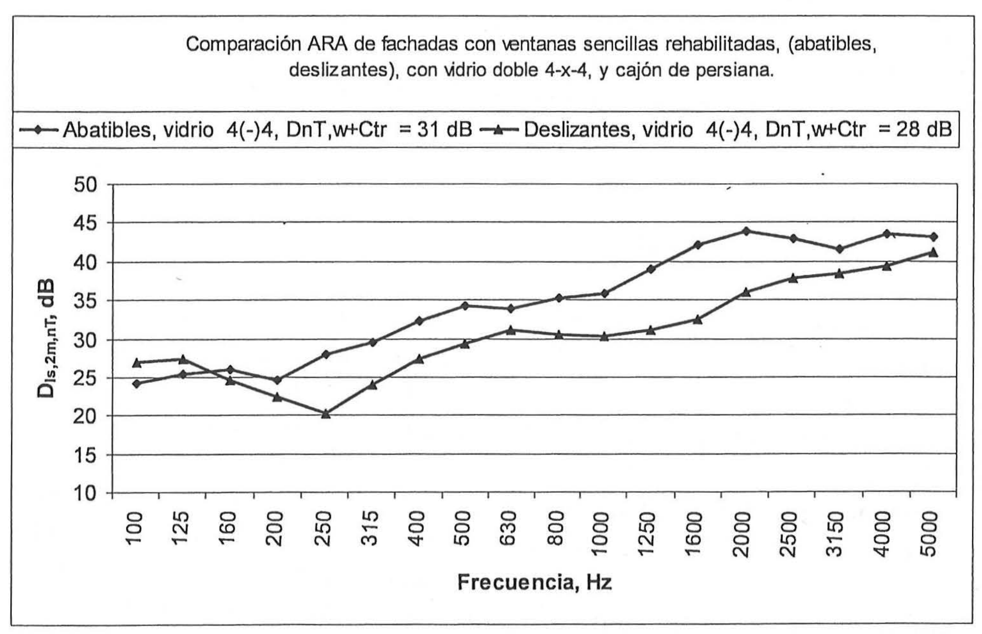


Figura 9.12: Comparación del aislamiento a ruido aéreo de fachadas de recintos con ventanas de apertura deslizante y abatible, con vidrios dobles 4-12-4.

La figura 9.12 muestra los resultados medidos in situ de las fachadas planas de 58 dormitorios y salones con ventanas de carpintería de aluminio clase 2, con cajones de persiana prefabricados, y vidrios dobles 4-12-4. Los datos geométricos medios de los dormitorios y salones son: volumen 29 m^3, área de la fachada 10 m^2 y el hueco de las ventanas 2,2 m^2. La parte ciega de la fachada era de fábrica de citara de ladrillo cerámico perforado, cámara y tabique. De los recintos, 46 tienen apertura deslizante y 12 abatible.

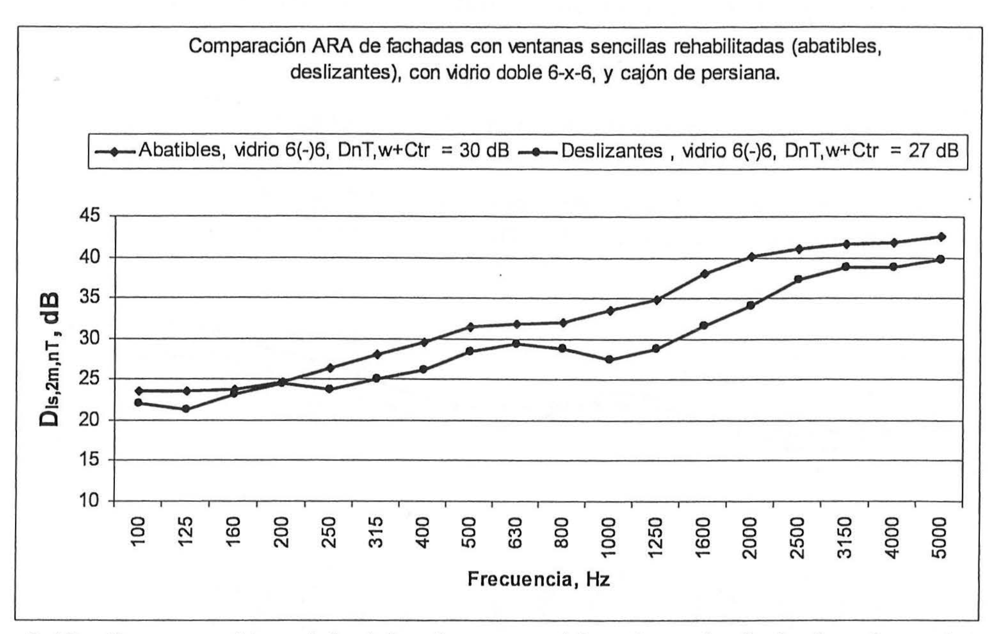


Figura 9.13: Comparación del aislamiento a ruido aéreo de fachadas de recintos con ventanas de apertura deslizante y abatible, con vidrios dobles 6-12-6.

En la figura 9.13 la muestra está formada por 46 dormitorios de fachadas planas con ventanas de carpintería de aluminio clase 2, con cajones de persiana prefabricados, y vidrios dobles 6-12-6. Los datos geométricos medios de los dormitorios son: volumen 27 m^3, área de la fachada 9 m^2 y el hueco de las ventanas 2,2 m^2. La parte ciega de la fachada era de fábrica de citara de ladrillo cerámico perforado, cámara y tabique. De los recintos, 40 tienen apertura abatible y 6 deslizante.

Fachadas de dormitorios con ventanas dobles

La figura 9.14 exhibe los resultados medidos in situ de la Diferencia de nivel estandarizada ponderada, $D_{ls,2m,nT,w} + C_{tr}$, en 160 fachadas planas de dormitorios con ventanas dobles. La parte ciega de la fachada era de fábrica de citara de ladrillo cerámico perforado cara vista, cámara y tabique. Datos de los recintos: volumen: 23 ± 4 m^3. área de la fachada: 8,3 ± 2,9 m^2; área del hueco: 1,4 ± 0,8 m^2 . En la situación original con dos ventanas sencillas sin clasificar de carpintería de aluminio corredera, con cajón de persiana prefabricado sin tratamiento acústico y tapa de registro hacia el interior del dormitorio, los vidrios de las ventanas son sencillos de espesor 4 mm. En esta situación la Diferencia de nivel estandarizada ponderada de la fachada es, $D_{ls,2m,nT,w} + C_{tr}$ = 37 dB. Posteriormente se sustituyó la ventana exterior por otra de aluminio también corredera y con vidrio sencillo de espesor 6 mm. Las mediciones posteriores realizadas muestran que la nueva Diferencia de nivel estandarizada ponderada de la fachada es, $D_{ls,2m,nT,w} + C_{tr}$ = 40 dB

Fachadas planas	Fachada original		Fachada rehabilitada		Distancia entre ventanas, mm
	Ventana interior	Ventana exterior	Ventana interior	Ventana exterior	
Espesor del vidrio, mm	4	4	4	6	140-160

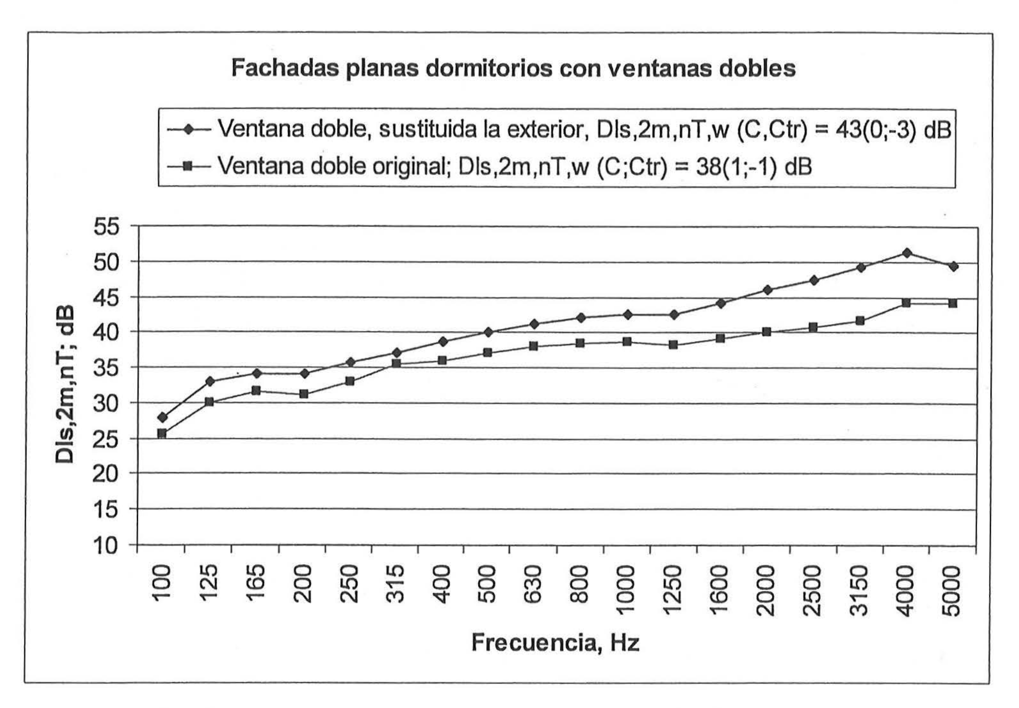


Figura 9.14. Ejemplo de aislamiento a ruido aéreo de fachadas in situ con ventanas dobles.

En la figura 9.15 se muestran los resultados de medida de la Diferencia de nivel estandarizada ponderada, $D_{ls,2m,nT,w}$ $+C_{tr}$ para fachadas planas de dormitorios de dimensiones semejantes a los de la figura 9.14. En este caso la parte ciega de las fachadas era de fábrica de asta de ladrillo cerámico perforado cara vista. En la rehabilitación se sustituyeron las dos ventanas y el cajón de persiana es prefabricado.

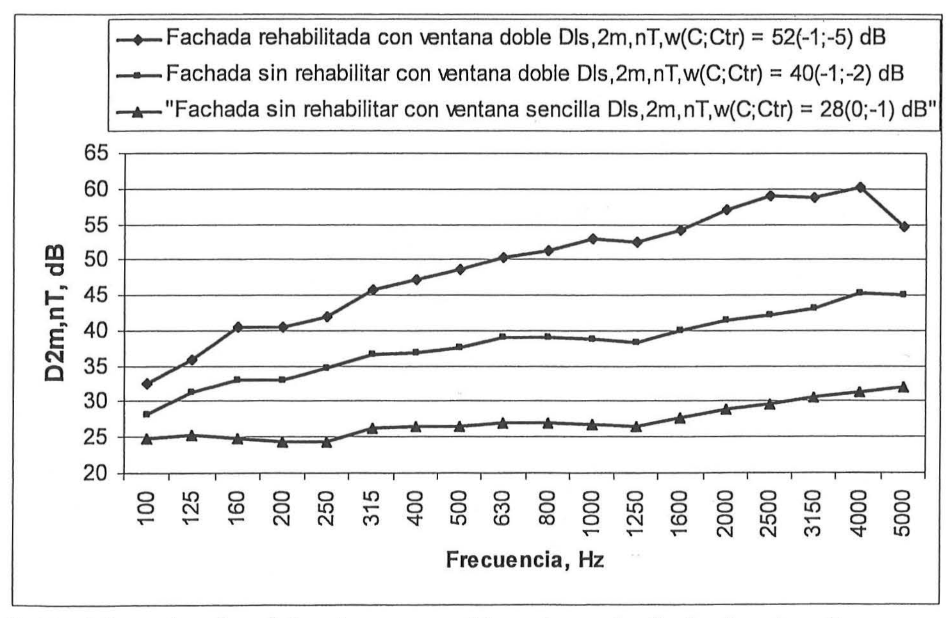


Figura 9.15. Ejemplo de aislamiento a ruido aéreo de fachadas in situ con ventanas dobles

9.8.- LAS CUBIERTAS Y SU AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO

La cubierta es la parte superior y exterior de un edificio, que en origen define la arquitectura de un edificio. Su forma se liga a un lugar (clima, materiales) y a una sociedad (estética, técnica constructiva). Tiene como función proteger las construcciones de la intemperie (lluvia, viento, nieve) y de controlar el flujo de energía térmica a su través. La cubierta es el factor que mas influye en la durabilidad de un edificio. Según su forma y su inclinación ejercen una influencia esencial sobre el aspecto de conjunto de un edificio. Las diferentes pendientes de las cubiertas dependen de los materiales usados para techar, el clima y el uso del recinto a cubrir.

Los principales requisitos funcionales son su estabilidad mecánica y sus estanquidades acústica, eólica, hídrica, pirolítica y térmica aunque algunas soluciones constructivas también requieren estanqueidad hídrica. Por este motivo todas las cubiertas se componen de elementos de sustentación: la armadura; de conformación: el tablero y de protección: la cobertura.
Las cubiertas, en relación con su función protectora frente a la lluvia, pueden ser de dos tipos:

- Cubiertas en pendiente (>10%) o de evacuación, que drenan el agua rápidamente por gravedad. Pueden ser permeables, por lo que a veces se las designa, también, como cubiertas secas.

- Cubiertas planas (<5%) o de retención, en las que la evacuación es relativamente lenta, siendo posible la formación de charcos o, incluso, el almacenamiento del agua. Para garantizar su estanquidad necesitan ser impermeables, por lo que se las puede designar, también, como cubiertas de obturación.

En el DB HR Protección frente al ruido del CTE, las exigencias de aislamiento acústico a ruido aéreo de las fachadas y cubiertas son las mismas.

La terminología del documento anterior denomina:
Cubierta: Cerramiento superior de los edificios, horizontal o con inclinación no mayor que 60º sobre la horizontal, que incluye el elemento resistente – forjado – más el acabado en su parte inferior – techo –, más revestimiento o cobertura en su parte superior. Debe considerarse cubierta tanto la parte ciega de la misma como los lucernarios.

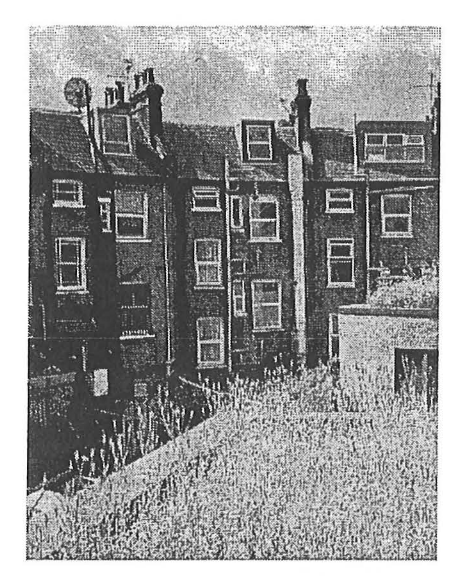
Elemento de cobertura: Conjunto de capas pertenecientes a una cubierta que están colocadas sobre el soporte resistente, cuya función es la de impermeabilizar la cubierta y aislarla térmica y acústicamente.

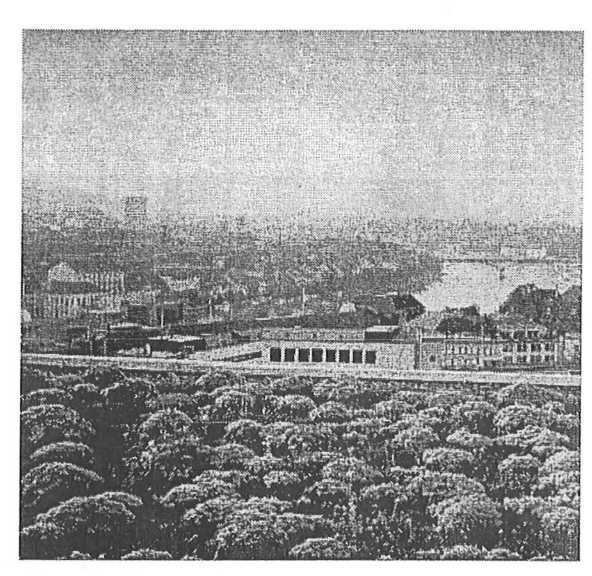
Cubierta ligera: Cubierta cuya carga permanente no exceda de 100 kg/m^2.

Existen diferentes tipologías de cubiertas, pueden ser planas o inclinadas, estar ventiladas o no, ser transitables o no, convencionales o invertidas, etc.

Actualmente a partir de la reconsideración ambiental de la arquitectura, las cubiertas ajardinadas o verdes (intensivas y extensivas) van cobrando mayor importancia.

Existen un elevado número de combinaciones entre las diferentes tipologías de cubiertas, por ello en la legislación acústica de la edificación, se publican unos catálogos de los elementos constructivos habituales, indicando sus propiedades higrotérmicas y acústicas.





A continuación se muestran los resultados de mediciones en laboratorio del índice de reducción acústica de algunas soluciones constructivas de cubiertas.

CUBIERTAS INCLINADAS LIGERAS

Cubiertas		
Esquema de la cubierta (Sección)	Composición	$R_{A,tr}$; dB
	Tejas encajadas.	16
	Pizarra sobre tabla ripia.	23
	Tablillas bituminosas sobre tablero de partículas	29

Figura 9.16: Ejemplos de cubiertas inclinadas ligeras

Cubierta sobre desván no utilizable. La distancia media entre la cubierta y el techo es mayor de 1 m.		
Esquema de la cubierta	Composición	$R_{A,tr}$; dB
	Tejado: tejas ajustadas Techo 1: - Lana mineral 200 mm y placa de yeso laminado de 13 mm Techo 2: - Lana mineral 200 mm y dos placas de yeso laminado de 13 mm	38-47 40-50
	Tejado: pizarra sobre tablas ripias Techo 1: - Lana mineral 200 mm y placa de yeso laminado de 13 mm Techo 2: - Lana mineral 200 mm y dos placas de yeso laminado de 13 mm	43 - 52 45-54
	Tejado: Tablillas bituminosas sobre tablero de partículas Techo 1: - Lana mineral 200 mm y placa de yeso laminado de 13 mm Techo 2: - Lana mineral 200 mm y dos placas de yeso laminado de 13 mm	49 - 55 50-56

Figura 9.17: Ejemplos de cubiertas inclinadas ligeras sobre desván no utilizable

Cubierta sobre desván utilizable.		
Esquema de la cubierta	Composición	$R_{A,tr}$; dB
	Tejado: tejas ajustadas Techo 1: - Lana mineral 200 mm y placa de yeso laminado de 13 mm Techo 2: Igual que 1 con 2 placas de yeso laminado de 13 mm	37-38 39-45
	Tejado: pizarra sobre tablas ripias Techo 1: - Lana mineral 200 mm y placa de yeso laminado de 13 mm Techo 2: Igual que 1 con 2 placas de yeso laminado de 13 mm	40-43 45-50
	Tejado: Tablillas bituminosas sobre tablero de partículas Techo 1: - Lana mineral 200 mm y placa de yeso laminado de 13 mm Techo 2: Igual que 1 con 2 placas de yeso laminado de 13 mm	47-52 48-53

Figura 9.18: Ejemplos de cubiertas inclinadas ligeras sobre desván utilizable

En las figuras 9.19 y 9.20 se muestran para tres cubiertas inclinadas ligeras su composición y los resultados de los ensayos de laboratorio del índice de reducción acústica.

Esquema de la cubierta	Composición	$R_w(C;C_{tr})$; dB
	Teja de cemento; Latas de madera + contralatas; lámina de protección frente a las condensaciones; fibra de vidrio 60 mm; barrera de vapor; latas de madera; yeso laminado 13 mm.	48(-3;-10)
	Teja de cemento; Latas de madera + contralatas; lámina de protección frente a las condensaciones; fibra de vidrio 120 mm; barrera de vapor; latas de madera; yeso laminado 13 mm.	50(-3;-9)
	Teja de cemento; Latas de madera + contralatas; lámina de protección frente a las condensaciones; fibra de vidrio 160 mm; barrera de vapor; latas de madera; yeso laminado 13 mm.	52(-3;-9)

Figura 9.19: Esquema y composición de tres cubiertas inclinadas ligeras

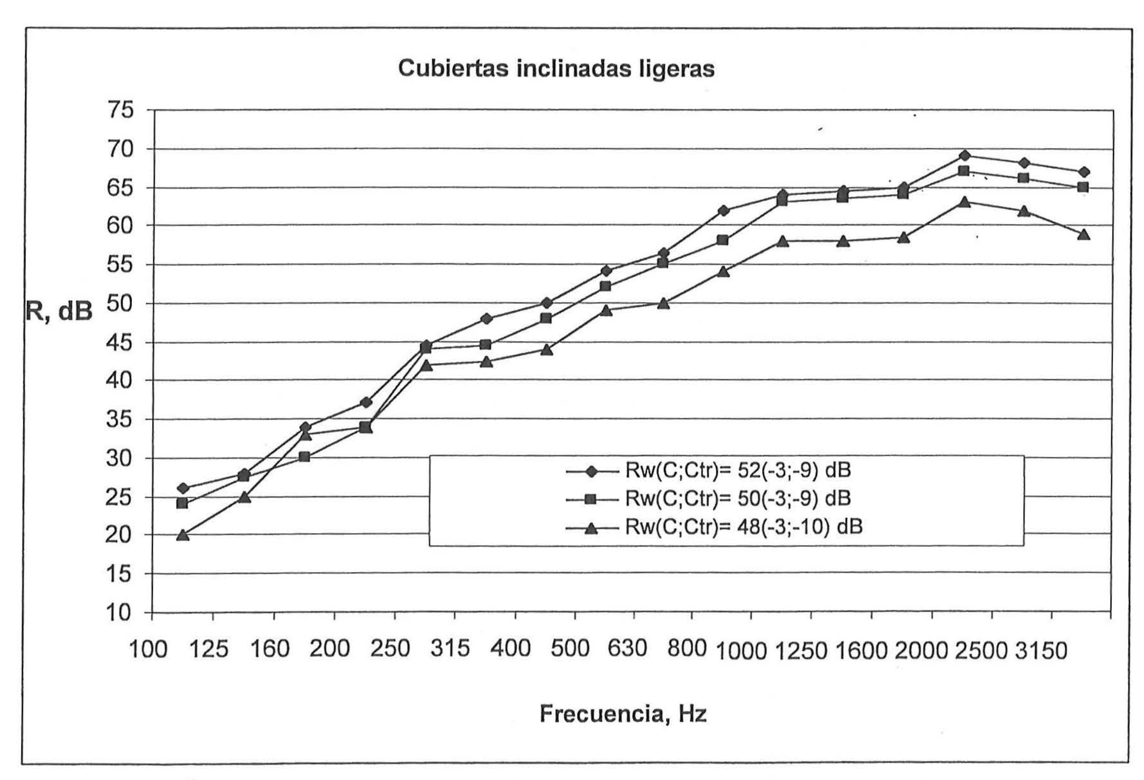


Figura 9.20: Índice de reducción acústica de tres cubiertas inclinadas ligeras

A continuación se muestran dos tipos de cubiertas habituales en la edificación española, que en general debido a su masa tienen un aislamiento acústico a ruido aéreo R_{Atr} suficiente para cumplir las mayores exigencias del DB HR Protección frente al ruido. Se puede estimar su aislamiento a ruido aéreo según la ecuación (5.18). En los recintos situados debajo de la cubierta, el ruido penetrará más fácilmente por la fachada de los mismos que por la cubierta.

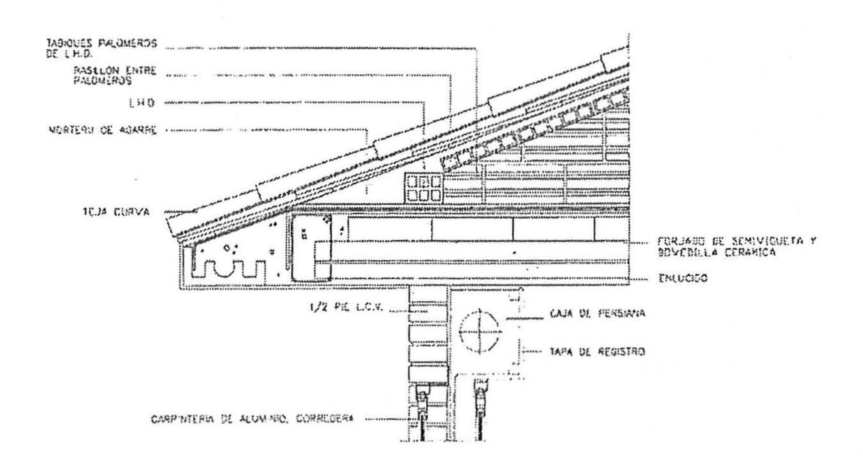


Figura 9.21: Sección de una cubierta inclinada con tabiques palomeros

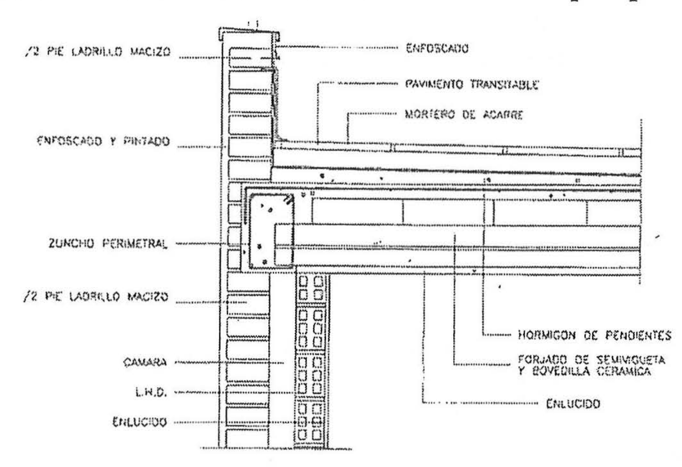


Figura 9.22: Sección de una cubierta plana no transitable con protección de grava.

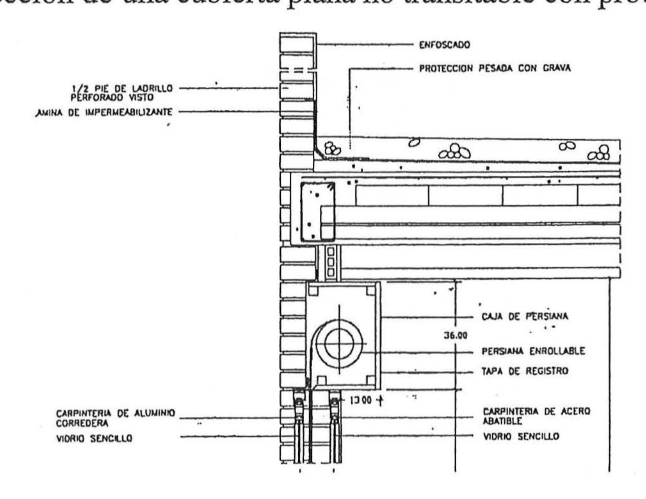


Figura 9.23: Sección de una cubierta plana transitable.

CUBIERTA DE FIBROCEMENTO		
	Fibrocemento; fibra de vidrio 110 mm, cámara 500 mm.	43
	- Con la misma cámara y fibra de vidrio de espesor 50 mm,	37

CUBIERTAS DE CHAPA PERFILADA

Se emplean sobre todo en las construcciones industriales, ya que al tener un peso propio reducido, la estructura de apoyo puede ser relativamente ligera. A continuación se muestra la composición de algunas de ellas y su índice ponderado de reducción acústica.

Esquema de la cubierta	Composición	R_w(C;Ctr); dB
	Perfil trapezoidal de acero 40/183-1.00	26
	Perfil trapezoidal de acero 40/183-1.00; fibra de vidrio 50 mm, cámara 500 mm	40
	Perfil trapezoidal de acero 40/183-1.00; fibra de vidrio 110 mm, cámara 500 mm	44
	Doble chapa trapezoidal de acero; espesor 1 mm; cámara 180 mm	42(-3,-6)
	Doble chapa trapezoidal de acero; espesor 1 mm; cámara 180 mm; lana mineral 60 mm	47(-2,-7)
	Perfil trapezoidal de acero 50/250-0.88; lámina de protección frente a las condensaciones; fibra de vidrio 100 mm; barrera de vapor; perfil trapezoidal de acero 135/310-0.88, perforaciones 13% ; fibra de vidrio 20 mm	36
	- Perfil trapezoidal de aluminio 50/180-0.88; lámina de protección frente a las condensaciones; fibra de vidrio 100 mm; barrera de vapor; perfil trapezoidal de acero 135/310-0.88	39
	- Con perfil trapezoidal de acero 50/250-0.88 en la parte superior en vez de aluminio	42
	Perfil trapezoidal de acero 50/250-0.88; lámina de protección frente a las condensaciones; fibra de vidrio 150 mm; barrera de vapor; perfil trapezoidal de acero 40/183-0.75	45

Figura 9.24: Índice de reducción acústica ponderado de cubiertas de chapa perfilada

BIBLIOGRAFÍA

[1] Monjo, J. (coordinador). Tratado de Construcción: Fachadas y cubiertas. I y II. Editorial Munilla-Lería, Madrid. 2003(I), 2007(II),

[2] Sánchez, Mª L. Técnicas de construcción convencionales y avanzadas, Fachadas y Cubiertas. Mairea Libros, E. T. S de Arquitectura UPM, Madrid. 2008.

[3] Paricio, I. La fachada de ladrillo. Ed. Bisagra, Barcelona, 2000

[4] Frida Bazzocchi; Facciate Ventilate, Alinea Editrice, Firenze 2002

[5] Pardal, C; Paricio, I. La fachada Ventilada y Ligera. Ed. Bisagra, Barcelona, 2006.

[6] UNE-EN ISO 140-4:- Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 4: Medición *in situ* del aislamiento a ruido aéreo entre locales.

[7] UNE-EN ISO 140-5: Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte5: Mediciones in situ del aislamiento acústico a ruido aéreo de elementos de fachada y de fachadas.

[8] UNE-EN ISO 140-10: Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 10: Medición en laboratorio del aislamiento a ruido aéreo de los elementos de construcción pequeños.

[9] UNE –EN 12354-3. (Enero 2001). Acústica de la edificación. Estimación de las características acústicas de las edificaciones a partir de las características de sus elementos. Parte 3: Aislamiento acústico a ruido aéreo contra ruido del exterior.

NOTAS

NOTAS

CUADERNO

298.01

cuadernos.ijh@gmail.com
info@mairea-libros.com

